



Luis Maria Mota Rodrigues

Licenciado em Engenharia Mecânica

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE TAGUCHI E ESTUDO DA
CAPACIDADE DO PROCESSO: CASO DE ESTUDO NA
INDÚSTRIA AUTOMÓVEL**

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,
Professora Auxiliar, FCT/UNL

Supervisor: Engenheiro José Manuel Laginha Lebre,
Engenheiro Mecânico, Delphi

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rui Fernando Martins

Arguente: Professor Doutor José Fernando Gomes Requeijo

Vogais: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos
Engenheiro José Manuel Laginha Lebre



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Setembro de 2013

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica
e Industrial

Luis Maria Mota Rodrigues

Licenciado em Engenharia Mecânica

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE TAGUCHI E ESTUDO DA CAPACIDADE DO
PROCESSO: CASO DE ESTUDO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL**

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela Matos, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Supervisor: Engenheiro José Manuel Laginha Lebre

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rui Fernando Martins

Arguente: Professor Doutor José Fernando Gomes Requeijo

Vogais: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos
Engenheiro José Manuel Laginha Lebre

Agradecimentos

Dado o término da presente dissertação, gostaria de agradecer a todos que directa ou indirectamente contribuíram para a mesma.

Primeiro, à minha orientadora, a Professora Ana Sofia Matos, pela sua orientação, incansável disponibilidade, preocupação, amabilidade nesta árdua tarefa, pois sem o seu apoio seria impossível o culminar da mesma.

Em segundo, ao José Manuel Lebre, meu supervisor, pela transmissão de conhecimentos e orientação, pela amizade e disponibilidade.

À Ana Filipa, minha companheira, pelo apoio carinho e compreensão, por ter estado, sempre, presente e disponível ao longo de todas as etapas deste trabalho. Muito obrigado.

À Delphi, por me ter permitido realizar este estudo e a todos os meus colegas que me apoiaram para assim o tornar viável, através dos seus conhecimentos e experiência.

À minha família, a qual me proporcionou os meios e que sempre me apoiou em todas as etapas da minha vida e que através do seu apoio incondicional tornaram esta fase final exequível.

Aos meus amigos e colegas de curso que me acompanharam durante todo o percurso académico, por todas as vivências, por todo o apoio e motivação que me foram dando ao longo deste caminho.

À FCT e a todos os Professores, pela formação que me foi dada, permitindo o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A todos os nomeados o meu sincero Obrigado!

Resumo

A complexidade do processo de encapsulamento de resinas epoxy em ignições, e o apertado controlo da qualidade, exige o desenvolvimento e o melhoramento contínuo dos processos de fabrico de forma a satisfazer as exigências dos clientes e a perpetuar a confiança que depositam na Delphi do Seixal. A indústria automóvel, a par da indústria aeronáutica, adoptaram a filosofia 6 sigma para o controlo dos processos de fabrico de modo a maximizar a segurança dos consumidores e a qualidade do produto final ao mesmo tempo que se minimiza o número de produtos não conformes, por milhão de unidades produzidas, o que obriga a utilização de ferramentas de controlo estatístico e de melhoramento contínuo. O recurso a ferramentas estatísticas e metodologias desenvolvidas por especialistas na matéria, permite uma análise metódica, científica e eficiente, do processo, poupando tempo e dinheiro aos engenheiros que as aplicarem com sabedoria e humildade.

O Controlo Estatístico do Processo, *SPC*, está presente na política de qualidade da Delphi, no entanto, o método de experimentação contínua a ser feito numa base intuitiva, seguindo uma filosofia de “Tentativa-Erro”, cujo resultado nem sempre é rápido e satisfatório. Fatores-chave, como a estequiometria das reações químicas da resina com o endurecedor e o perfil de cura em função do tempo e temperatura, tornam o processo altamente sensível a variações provocadas por agentes externos, que podem comprometer a qualidade final do produto, o que motiva a introdução de ferramentas robustas em todas as etapas de desenvolvimento e controlo do processo.

A carteira de clientes da Delphi Seixal, no campo das ignições, conta com marcas de renome, como é o exemplo da General-Motors, Mercedes-Benz, BMW, grupo PSA, entre outros. O aumento dos volumes de fabrico, torna por vezes necessária, a instalação de novas linhas de produção, que necessitam de ser certificadas para produzir de acordo com os padrões de qualidade da Delphi e critérios do cliente, exigindo a realização de um estudo rigoroso onde são definidos os parâmetros de processo e avaliada a sua capacidade.

Este trabalho procura definir a melhor combinação de fatores controláveis que aumentam a robustez do processo, através do desenho de experiências de Genichi Taguchi, e verificar se os equipamentos se encontram aptos para produzir segundo os critérios de qualidade da Delphi (Cartas de controlo de Walter A. Shewhart).

Palavras Chave

Desenho de experiências (DOE), Genichi Taguchi, Controlo estatístico do Processo (SPC), vazamento e cura de *epoxy*

Abstract

Ignition encapsulation process using epoxy resins is very strict and complex, thus, it requires continuous development and enhancement in order to meet customer's requirements and keep the confidence that Delphi Seixal manufacturing services represents. Like aeronautics, automotive industry follows a 6 sigma philosophy to bring the highest safety and quality standards to the end user, at the same time, it reduces non-conform manufactured parts per million of units produced. Taping the full potencial of 6 sigma, means, using a hand full of statistical process control and quality enhancement tools in continuous development since the last decadest. When applied with wisdom and humble, this tools allow an efficient, methodic and cientific approach to process control, saving time and reducing costs.

Statistical Process Control, *SPC*, is one of the quality tools present in Seixal Delphi automotive plant quality policies, however, a "one-factor-at-a-time" experimental approach is still beeing applied in new process design/development, which results in great lost time, poor effectiveness and sometimes, unreliable findings.

Stoichiometry between resin and hardener chemical reactions and gel-cure time-temperature profile are key players to achieve the highest system output in ingition encapsulating process. The combination of this parameters turn the process higly sensitive to external agents/factors which can compromise final product quality. The use of robust quality engineering tools like Taguchi methods for design of experiments and *SPC* for process monitoring enhances process quality and liability, making it more robust to external causes.

Delphi Seixal poduces ignitions for higly recognized costumers like BMW, Mercedes-Benz, General-Motors and PSA, among others. The gowing volumes, bring the need to install new production lines which have to be certified to guarentee compliance with Delphi automotive qualitty standards and costumer quality interface specifications. Equipment evaluation is made using quality tools like *SPC*, while process fine tuning is made using tools like Taguchi methods for *DOE*.

This disseration is focused on determing the best factor level combination of control factors (system inputs) that enhance process robustness. To achieve such goals, Taguchi *DOE* approach and control charts were used, both for deciding wich main factors were more important in process setup and verify if process is under control and equipment is capable of producing between specification.

Key Words

Design of Experiments (DOE), Genichi Taguchi, Statistical Process Control (SPC), *Epoxy* cure and encapsulation

Siglas

| | |
|-----|---|
| CET | Coeficiente de Expansão Térmica |
| DOE | <i>Design of Experiments</i> |
| LC | Linha Central |
| LIC | Limite Inferior de Controlo |
| LOA | <i>Lack of Adhesion</i> (Falta de adesão) |
| LOI | <i>Lack of Impregnation</i> (Falta de impregnação) |
| LSC | Limite Superior de Controlo |
| R&R | Repetibilidade e Reprodutibilidade |
| SPC | <i>Statistical Process Control</i> (Controlo Estatístico do Processo) |

Acrónimos

| | |
|-------|----------------------|
| ANOVA | Análise de Variância |
|-------|----------------------|

Simbologia

| | |
|----------------------|--|
| α | Erro do Tipo I |
| Δ | Intervalo de especificação da Função-Perda |
| σ | Desvio Padrão |
| $\hat{\sigma}$ | Desvio padrão da população estimado |
| $\hat{\mu}$ | Média da população estimada |
| A | Perda de qualidade em unidades monetárias |
| C_{pk} | Índice de capacidade do processo |
| C_p | Índice potencial do processo |
| F_0 | F de Fisher (distribuição de Fisher) |
| G' | Módulo de energia armazenada |
| G'' | Módulo dissipativo |
| g.l. | Graus de liberdade da matriz de Taguchi |
| L | Função-Perda de Taguchi |
| L_N | Matriz de Taguchi de índice N |
| m | Amostras |
| M_s | Variância residual |
| N | Número de observações (SPC) de experiências (DOE) |
| n | Observações por amostra (SPC) ou por experiência (DOE) |
| P_x | Contribuição do fator X |
| \bar{R} | Amplitude média |
| $\overline{\bar{R}}$ | Média das amplitudes |
| S/N | Índice Sinal-Ruído |
| SS_T | Variação total |
| SS_x | Variação do fator X |
| t | Tempo |
| T | Temperatura |
| t_g | Tempo de geleificação |
| t_v | Tempo de vitrificação |
| T_g | Temperatura de transição vítrea |
| w | Característica da qualidade da amostra |
| X | Resposta do fator X |
| y | Característica nominal da Função-Perda |
| \bar{X} | Média amostral |
| $\overline{\bar{X}}$ | Média das médias amostrais |

Índice Geral

| | |
|--|----------|
| UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA | I |
| Luis Maria Mota Rodrigues | I |
| Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela Matos, Professora Auxiliar, FCT-UNL.... | I |
| Capítulo 1 – Introdução | 1 |
| 1.1. Contextualização | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 2 |
| 1.3. Estrutura da Dissertação | 3 |
| Capítulo 2 – Desenvolvimentos Teóricos..... | 5 |
| 2.1. Evolução da Qualidade | 5 |
| 2.2 Controlo estatístico do Processo - <i>SPC</i> | 6 |
| 2.2.1 <i>Cartas de Controlo</i> | 7 |
| 2.2.2 <i>Introdução de Cartas num novo processo</i> | 10 |
| 2.3 Planeamento de experiências | 16 |
| 2.3.1 <i>O Planeamento de experiências de Genichi Taguchi</i> | 16 |
| 2.3.2 <i>Metodologia do Desenho de Experiências de Taguchi</i> | 22 |
| 2.3.4 <i>Desenhos Fatoriais com 3 Fatores a 3 Níveis</i> | 22 |
| 2.3.5 <i>Índice Sinal/Ruído numa Análise do Tipo “Nominal-o-Melhor” (Nominal-the-Best)”</i> | 24 |
| 2.3.6 <i>Análise de Variância - ANOVA</i> | 24 |
| 3. Caracterização da Delphi, do Processo e da Matéria-Prima | 27 |
| 3.1 Caracterização da Delphi | 27 |
| 3.2 Processo de Vazamento de <i>Epoxy</i> | 27 |
| 3.3 Caracterização das resinas <i>epoxy</i> | 28 |
| 3.4 Cura de <i>epoxys</i> | 29 |
| 4. Metodologia Aplicada | 33 |
| 4.1 Controlo Estatístico de Processo - <i>SPC</i> | 33 |
| 4.1.1 <i>Gage RR</i> | 34 |
| 4.1.2 <i>Análise da capacidade de vazamento dos reservatórios</i> | 35 |
| 4.1.3 <i>Análise da capacidade de vazamento dos Injetores</i> | 38 |
| 4.2 Desenho de Experiências | 42 |
| 4.2.1 <i>Equipamentos e produtos envolvidos no desenho de experiências</i> | 42 |
| 4.2.2 Etapas experimentais..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 5– Apresentação e discussão dos resultados..... | 58 |
| 5.1 Controlo estatístico de Processo – SPC..... | 58 |
| 5.1.1 – Estudo R&R (<i>Repetição e reprodutibilidade</i>) | 58 |
| 5.1.2 <i>Análise da Capacidade dos reservatórios</i> | 60 |
| 5.1.3 <i>Análise da Capacidade dos Injetores</i> | 60 |
| 5.2 Desenho de experiências | 61 |
| 6. Conclusões e Trabalhos futuros | 67 |
| 6.1 Avaliação da capacidade do equipamento de vazamento de <i>epoxy</i> | 67 |
| 6.2 Maximização da qualidade do processo de cura de ignições..... | 68 |
| 6.3 Trabalhos Futuros | 69 |
| Bibliografia..... | 71 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Esquema de uma Carta de Controlo | 8 |
| Figura 2.2 - Exemplo de algumas regras numa Carta de Controlo | 9 |
| Figura 2.3 - Regras da Western Electric | 10 |
| Figura 2.4 - Histograma com 15 classes..... | 13 |
| Figura 2.5 - Algumas distribuições contínuas e discretas..... | 14 |
| Figura 2.6 – representação gráfica da média e mediana (a) quando são coincidentes, (b) quando não coincidem. | 14 |
| Figura 2.7 – Comparação entre processo 3sigma e 6 sigma | 15 |
| Figura 2.8 - Representação dos parâmetros de uma experiência..... | 17 |
| Figura 2.9 – Função-Perda de Taguchi | 19 |
| Figura 2.10 – Função-Perda de Taguchi. A perda em função da variabilidade do processo..... | 19 |
| Figura 2.11 – Engenharia da Qualidade Categorias do controlo da qualidade | 20 |
| Figura 2.12 – Matriz L27 | 23 |
| Figura 3.1 – Evolução da viscosidade do Epoxy quando curado a uma temperatura constante. | 31 |
| Figura 4.1 – Equipamento de medição utilizado no SPC – Balança Metler Toledo ICS425 | 34 |
| Figura 4.2 – Análise do Estudo R&R com dados tratados no <i>Software MinitabV16</i> | 35 |
| Figura 4.3 – esquema de funcionamento da válvula de 3-vias..... | 36 |
| Figura 4.4 – procedimento de preparação e recolha de amostras de material | 36 |
| Figura 4.5 – Análise da capacidade do equipamento feita pelo <i>MinitabV16</i> – <i>1 ponto fora dos limites de controlo</i> | 37 |
| Figura 4.6 – Análise da capacidade do equipamento feita pelo <i>MinitabV16</i> – <i>1ª</i> iteração. Nenhum ponto fora dos limites de controlo. | 37 |
| Figura 4.7 – copos agrupados por peso. | 38 |
| Figura 4.8 – Palete preparada para ser vazada..... | 39 |
| Figura 4.9 – Procedimento de execução da análise da capacidade dos injetores. | 39 |
| Figura 4.10 – (à esquerda) carta de controlo X, (à direita) carta de controlo R. Primeira análise. | 40 |
| Figura 4.11 – Carta de controlo após primeira iteração – todos os pontos encontram-se dentro de controlo estatístico. | 41 |
| Figura 4.12 – Índice de Capacidade do equipamento <i>Huebers2665</i> para o injetor 1 na posição 1 | 42 |
| Figura 4.13 – Viscosímetro Brookfield TC-502 | 43 |
| Figura 4.14 – Evolução da viscosidade do <i>epoxy</i> curado em diferentes perfis isotérmicos | 43 |
| Figura 4.15 – Forno de laboratório – “ <i>Box Oven</i> ” | 44 |
| Figura 4.16 – Fornos industriais da <i>Shuang&Yeong</i> | 44 |
| Figura 4.17 - <i>Dataloggers</i> | 45 |
| Figura 4.18 – Teste final. (à esquerda) medição do <i>output(kV)</i> , (ao centro) disparo em aberto, (à direita) <i>software LabView8.2</i> para registo de dados | 46 |
| Figura 4.19 – (à esquerda) “switch-box”, (à direita) osciloscópio <i>Tektronix TDS3014B</i> | 46 |
| Figura 4.20 – (à esquerda) imagem de ignição em sobreaquecimento, (à direita) camara termográfica <i>Termo Tracer</i> | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.21 – Da esquerda para a direita : case, primário, secundário. | 48 |
| Figura 4.22 – Procedimento de execução do DOE. Etapas experimentais..... | 49 |
| Figura 4.23 - diagrama de Ishikawa | 50 |
| Figura 4.24 – Curvas de viscosidade (cP) em função do tempo (min) para o <i>epoxy</i> curado com diferentes perfis de temperatura isotérmicos. | 51 |
| Figura 4.25 – Da esquerda para a direita: Peça com boa impregnação, Peça com má impregnação, perfil de temperatura da experiência 3..... | 52 |
| Figura 4.26 – fatores de controlo P1, P2 e P3 do DOE de Taguchi e seus níveis 1, 2 e 3. | 53 |
| Figura 4.27 –.paleta preparada para entrar no forno do pré-aquecimento..... | 55 |
| Figura 4.28 –.perfil registado pelo <i>datalogger</i> durante experiência 4. | 55 |
| Figura 4.29 sequência de atividades na fase de preparação da camara para o vazamento das ignições | 56 |
| Figura 4.30 (à esquerda) reservatórios de produção da resina e endurecedor, (à direita) camara de vazamento..... | 57 |
| Figura 5.1 – Estudo feito pelo <i>MinitabV16</i> para avaliação da capacidade do equipamento de medição. | 59 |
| Figura 5.2 – Evolução da cura do epoxy a diferentes temperaturas da primeira zona | 62 |
| Figura 5.3 – (a) Resultados da experiência 3 com boa adesão do materia, (b) resultado da experiência 4 com | 63 |
| falta de adesão severa. | 63 |
| Figura 5.4 – Análise feita no <i>MinitabV16</i> para a análise do índice S/N médio do efeito das respostas. | 64 |
| Figura A.1 – Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 1 Fila 1 | 77 |
| Figura A.2 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 1, Fila 2..... | 78 |
| Figura A.3- Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 2, Fila 3..... | 79 |
| Figura A.4- Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 2, Fila 4 | 80 |
| Figura A.5 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 3, Fila 5 | 81 |
| Figura A.6 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 3, Fila 6 | 82 |
| Figura A.7 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 4, Fila 7 | 83 |
| Figura A.8 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 4, Fila 8 | 84 |
| Figura A.9 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 5, Fila 9 | 85 |
| Figura A.10 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 5, Fila 10 | 86 |
| Figura A.11 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 6, Fila 11 | 87 |
| Figura A.12 - Carta <i>X</i> e Carta R. Injector 6, Fila 12 | 88 |
| Figura A.13 - Análise da capacidade do reservatório do endurecedor para vazamento igual a 50gramas..... | 89 |
| Figura A.14 - Análise da capacidade do reservatório do endurecedor para vazamento iguala 100gramas..... | 89 |
| Figura A.15 - Análise da capacidade do reservatório da resina para 125gramas..... | 90 |
| Figura A.16 -Análise da capacidade do reservatório da resina para 250gramas | 90 |
| Figura B. 1 - Perfil de cura do <i>epoxy</i> a 80°C na cuba de laboratório..... | 94 |

| | |
|---|----|
| Figura B. 2 - Perfil de cura do <i>epoxy</i> a 85°C na cuba de laboratório..... | 94 |
| Figura B. 3 - Perfil de cura do <i>epoxy</i> a 90°C na cuba de laboratório..... | 95 |
| Figura B. 4 - Perfil de cura do <i>epoxy</i> a 95°C na cuba de laboratório..... | 95 |
| Figura B. 5 - Perfil de cura do <i>epoxy</i> na cuba do laboratório..... | 96 |
| Figura B. 6 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 1 | 96 |
| Figura B. 7 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 2 | 97 |
| Figura B. 8 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 3 | 97 |
| Figura B. 9 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 4 | 97 |
| Figura B. 10 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 5 | 98 |
| Figura B. 11 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 6 | 98 |
| Figura B. 13 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 8 | 99 |
| Figura B. 11 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 9 | 99 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Cartas de Controlo de Shewart..... | 7 |
| Tabela 2.2 – Matriz <i>L9</i> de Taguchi..... | 22 |
| Tabela 4.1 – Ordem de execução do primeiro grupo de pesagens do estudo <i>R&R</i> | 34 |
| Tabela 4.2 – Pontos fora de controlo na primeira análise dos resultados da amostra..... | 41 |
| Tabela 4.3 – Limites de controlo e valor estimado de μ e σ | 41 |
| Tabela 4.4 – <i>set-up</i> das experiências realizadas em laboratório..... | 52 |
| Tabela 4.5 – matriz de planeamento de experiências com níveis codificados | 54 |
| Tabela 4.6 – matriz de planeamento de experiências com níveis reais | 54 |
| Tabela 4.7 – Descrição das atividades de preparação das experiências e respetiva duração | 55 |
| Tabela 4.8 – duração das atividades de preparação da camara para o vazamento das ignições..... | 56 |
| Tabela 4.9 – Ordem de execução do Desenho experimental e sua replicação | 57 |
| Tabela 4.10 – Resultados da primeira experiência e sua replicação. | 58 |
| Tabela 5.1 e 5.2 – Resultados do estudo <i>R&R</i> . percentagem de contribuição de cada fator para a variabilidade do estudo. | 59 |
| Tabela 5.3 Resultados da análise de capacidade feita pelo MinitabV16 para os reservatórios de resina e endurecedor. | 60 |
| Tabela 5.4 Resultados da análise de capacidade feita para os injetores..... | 61 |
| Tabela 5.5 – resultados da experiência com metodologia aproximada a um-fator-de-cada-vez | 63 |
| Tabela 5.6 – Resposta medida na primeira experiência aplicando a metodologia de Taguchi e sua replicação | 64 |
| Tabela 5.7 – Resumo das variáveis controláveis e erro | 65 |
| Tabela 5.8 – melhor combinação de níveis esperada | 65 |
| Tabela 5.9 – Anova considerando S/N nominal..... | 66 |
| Tabela 5.10 – Valores de S/N nominal para cada experiência | 66 |
| Tabela 5.11 – Melhor S/N nominal esperado..... | 66 |
| Tabela A.1 - Ordem de execução do primeiro <i>run</i> de medições | 74 |
| Tabela A.2 - Ordem de execução do segundo run de medições..... | 75 |
| Tabela B. 1 - Resultados da primeira experiência do <i>DOE</i> de Taguchi | 92 |
| Tabela B. 2 - Resultados da primeira replicação do <i>DOE</i> de Taguchi | 93 |

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Contextualização

Com a crescente competitividade dos mercados, o conceito da qualidade tem vindo a desempenhar um papel crucial na escolha dos bens e serviços. Do lado da oferta, este conceito tem elevada importância quando se associa a opinião sobre um determinado produto, à imagem da marca que o comercializa. Para o consumidor, qualidade tem um significado de durabilidade, confiança e um expectável elevado grau de satisfação .

Na indústria, a qualidade é avaliada em função das características do processo: variabilidade reduzida; reduzida sensibilidade a pequenas alterações na matéria-prima (entre lotes), erros de operação ou *setup de equipamentos*; sob controlo estatístico. Para estudar e melhorar a qualidade de um produto, têm-se desenvolvido ferramentas estatísticas e idealizado novas abordagens e filosofias de controlo do processo. Algumas dessas ferramentas são: as cartas de controlo, que permitem determinar em tempo real a estabilidade do processo; os histogramas, que permitem avaliar a capacidade do processo; o desenho de experiências (*Design of Experiments - DOE*), que permite otimizar o processo através da execução de experiências fora da linha de produção; o diagrama de Ishikawa, que permite identificar a origem de um problema através do debate de ideias entre varias pessoas de uma organização, com diferentes competências e grau hierárquico; a filosofia de Genichi Taguchi que através da utilização de um grupo de ferramentas estatísticas procura melhorar, reduzir perdas monetárias e controlar os processos de fabrico, entre muitas outras.

Na Delphi do Seixal, o controlo estatístico de processo é utilizado no controlo de novos processos e processos maduros. Relativamente à estratégia de experimentação, tem-se aplicado, em particular no *Potting System Assembly* (linha de vazamento e cura de *epoxy*), a experimentação de um-fator-de-cada-vez. Não existe nenhum método de análise quantitativo (apenas qualitativo), nem existe sequer um planeamento de experiências metódico. As experiências são planeadas de acordo com a intuição e conhecimentos dos engenheiros envolvidos e as análises baseadas em ensaios destrutivos e inspeção visual. Deste modo, considerou-se interessante explorar esta ideia e tornar o *DOE* mais robusto e sistemático, baseando-se na filosofia de Taguchi para definir o tempo de pré-aquecimento e de gel no processo de fabrico de ignições, conseguindo desta forma, definir com segurança os limites de permanência em zona, com base numa análise quantitativa. Com este estudo foi possível, pela primeira vez, construir com rigor um desenho de experiências, abrindo portas para a aplicação desta ferramenta em processos semelhantes.

1.2. Objetivos

Executado em duas fases distintas, os objetivos deste trabalho centram-se em dois aspetos:

- Objetivo 1: Avaliação da capacidade do equipamento de vazamento de *epoxy*;
- Objetivo 2: Maximização do processo de cura de ignições vazadas com *epoxy*;

O primeiro objetivo, é analisar se o equipamento cumpre os padrões de qualidade estabelecidos pela *Delphi*, para todas as suas divisões. Sendo o *epoxy* uma mistura de dois componentes: resina e endurecedor; é essencial que a estequiometria química seja garantida, de forma a que a cura atinja o maior grau de eficiência. Testar a capacidade de vazamento dos reservatórios de resina e de endurecedor é o primeiro passo para averiguar se o processo terá ou não capacidade de responder às exigências do controlo da qualidade. Caso tenha, então será testado o processo de injeção pelo mesmo método. A utilização das cartas de controlo permite analisar todas as amostras recolhidas durante a fase de implementação, estimar os limites de controlo e centrar o processo.

Com a introdução da metodologia de Taguchi para o desenho de experiências, pretende-se criar um método de abordagem conciso que permita aumentar a robustez e reduzir a variabilidade do processo através da redução da sensibilidade a causas comuns de ruído, tais como, *setup* do equipamento, variações nos lotes de matéria-prima, variações climáticas, paragens não programadas, entre outras. Este método pretende, no futuro, substituir a estratégia de experimentação utilizada e que tem como base, variar um-fator-de-cada-vez.

1.3. Estrutura da Dissertação

No capítulo 2, encontra-se descrita toda a informação teórica relevante para a execução da metodologia experimental. É abordado o tema do controlo estatístico de processo, onde se apresentam as diversas ferramentas da qualidade das quais se dá destaque às cartas de controlo, ao diagrama de Ishikawa e ao Histograma, descrevendo quais as vantagens e propósito da sua aplicação. Neste capítulo é igualmente abordado o tema do desenho de experiências segundo a filosofia de Genichi Taguchi e das ferramentas que acompanham o método, de onde se destaca o método de análise de variância e o índice sinal/ruído.

O capítulo 3 é dedicado à Delphi, às resinas *epoxy* e ao processo de vazamento. Interessa para este estudo conhecer as propriedades dos *epoxys*, as suas propriedades físicas e químicas e que influencia têm na escolha dos parâmetros de processo. São apresentados estudos relacionados com a cura, com a seleção de *epoxys* para ignições, estudos sobre as propriedades da resina e endurecedor e o seu comportamento mecânico. É feita a caracterização da Delphi, fazendo referencia à forma como se divide, ao tipo de filosofia e à sua política de qualidade, quais os *standards* pelos quais se rege.

O capítulo 4 refere-se à parte experimental. Está dividido em dois subcapítulos, um dedicado ao *SPC* e outro ao desenho de experiências. São descritas as atividades de análise da capacidade dos reservatórios e da capacidade de vazamento bem como o *DOE* e todas as experiências que fundamentaram a escolha dos fatores de controlo e seus níveis.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados. Este capítulo, à semelhança do capítulo 4, divide-se igualmente em dois subcapítulos. Os resultados das diversas análises feitas são discutidos de forma crítica e objetiva, para que no capítulo 6 sejam apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Desenvolvimentos Teóricos

O salto tecnológico na indústria automóvel dá-se no início do século XX quando Henry Ford, fundador da *Ford Motors Company* idealiza o fabrico em série com o icónico modelo *Ford T*. Este método revolucionário distingue-se do método tradicional por permitir que o processo de fabrico seja realizado por vários operários em simultâneo, mas com a diferença de que cada operário é responsável apenas por uma ou por um conjunto de tarefas. Isto permitiu aumentar a produtividade e construir vários automóveis num curto intervalo de tempo, em vez de, um automóvel de cada vez. Atualmente, o conceito de produção em série ainda continua presente na indústria automóvel, embora, como é natural, otimizado devido ao avanço tecnológico, ao desenvolvimento de novos modelos de fabrico, à substituição de pessoas por autómatos e ao aparecimento de novos conceitos, como por exemplo o conceito de qualidade, o conceito “*just-in-time*”, à melhoria contínua, à padronização dos processos, etc. A produção em massa, o desenvolvimento tecnológico e o aumento da oferta e da competitividade dos mercados, exigiu a melhoria da qualidade dos produtos e processos de fabrico, levando à evolução do conceito até aos padrões atuais.

2.1. Evolução da Qualidade

A qualidade é análoga à evolução humana e é um fator crítico no sucesso de qualquer organização, assumindo um papel importantíssimo na relação entre consumidor final e produtor/prestador de serviços. Segundo Deming, “*Good quality means a predictable degree of uniformity and dependability with a quality standard suited to the customer*” [1], isto é, qualidade significa uniformização e fiabilidade adequada às necessidades do consumidor. Na indústria, o conceito de Qualidade tem início nos primórdios da revolução industrial, em meados do século XVIII, começando a ganhar alguma importância no final do século XIX e primeira metade do século XX, quando a produção em massa é já uma realidade, permitindo a colocação no mercado de produtos a preços baixos e competitivos. De modo a dar resposta ao aumento da procura, surge a necessidade de criar departamentos de inspeção da qualidade do produto final, com objetivo de selecionar apenas os produtos que se encontrem dentro das especificações de fabrico e desta forma aumentar a sua fiabilidade e o grau de confiabilidade e satisfação do consumidor final. Segundo Juran, “*Quality is fitness for use*” [1], ou seja, um produto apresenta qualidade se estiver ajustado às exigências de utilização para as quais foi concebido.

O conceito de qualidade vem-se desenvolvendo ao longo do século XX, mas é no período entre as duas grandes guerras, que se verifica o desenvolvimento de técnicas estatísticas para avaliação da qualidade por amostragem e do controlo da qualidade durante a fase de produção, que até à data fazia parte da inspeção do produto acabado, destacando-se neste campo personalidades como Walter A. Shewart (1911-1967), Harol F. Dodge e Harry G. Roming. No pós-guerra, a gestão da qualidade passa a ter um papel prioritário dentro das organizações, principalmente no Japão, devido

à necessidade de adotar estratégias que permitissem a rápida recuperação da economia, num período em que o país se confrontava com sanções económicas e políticas que condicionavam o seu desenvolvimento. Devido à escassez de matéria-prima e às dificuldades supraditas, era necessário criar produtos altamente confiáveis (com elevada qualidade) e a um preço acessível, de modo a competir com o mercado ocidental, na sua maioria americano [2].

Hoje em dia o conceito de qualidade na indústria está presente em todos os níveis da organização, de forma maximizar o nível de satisfação global dos seus consumidores, reduzindo consequentemente os custos (aumentando o lucro marginal) e tornando-a altamente competitiva.

2.2 Controlo estatístico do Processo - *SPC*

O controlo estatístico do Processo ou *SPC* (na terminologia anglo-saxónica), é uma das áreas do controlo estatístico da qualidade e tem como objetivo primordial compreender, monitorizar e melhorar a performance do processo de fabrico ao longo do tempo [3]. Quando se pretende desenvolver e comercializar um produto de excelência (fiável, robusto e com qualidade), que consiga criar junto do cliente um elevado grau de satisfação e conforto, é fundamental que o processo de fabrico seja altamente capaz e estável, isto significa, que é possível produzir muito próximo do valor nominal de especificação, com pouca variabilidade e que, os fatores que provocam instabilidade ao processo, tais como, alteração da matéria-prima, avarias em equipamentos e erros de operação são muito reduzidos e estão controlados. É necessário haver um acompanhamento cuidado e é, neste ponto, que o *SPC* assume o seu papel essencial na melhoria contínua do mesmo. Idealizado e desenvolvido por Walter Andrew Shewhart (1891-1967), engloba um conjunto de ferramentas que auxiliam os engenheiros a promover a estabilidade e a aumentar a capacidade do processo através da redução da sua variabilidade. São elas:

1. O Histograma
2. As Folhas de Rastreio ou *Check Sheets*
3. O Diagrama de Pareto
4. O Diagrama de causa-efeito ou espinha de peixe
5. O Diagrama de concentração de defeitos
6. O Diagrama de dispersão
7. As Cartas de Controlo

Shewhart, desenvolveu a sua própria teoria de variabilidade acreditando que qualquer processo estável sofre pequenas variações devido ao ruído provocado por agentes externos, que apelidou de “*stable system of chance causes*”, considerando que estas variações não são causas especiais por fazerem parte integrante do processo [4], mas sim causas comuns de variação. Woodall [3], considera que as mesmas causas comuns identificadas por Shewart, são fonte da natureza do processo e só podem ser eliminadas alterando-o, enquanto as causas de variação especiais são provocadas por perturbações excecionais e podem ser eliminadas sem interferir diretamente no processo.

A utilização das ferramentas de controlo deve abranger todas as equipas que participam no processo de fabrico: técnicos de manutenção, operadores, consultores de qualidade, engenharia, cargos de gestão, etc. Sem a participação ativa de todos os indivíduos, a utilização do SPC não consegue trazer benefícios para a organização.

2.2.1 Cartas de Controlo

As cartas de controlo são ferramentas cujo objetivo é analisar a estabilidade do processo durante a fase de produção (processos maduros) ou na fase de implementação (novos processos), permitindo a identificação das causas de variação do mesmo.

Segundo Pereira e Requeijo [2], “uma carta de controlo é definida por um gráfico que mostra a evolução ao longo do tempo de uma estatística, w , referente a uma determinada característica da qualidade. Montgomery [4], partilha da mesma opinião e afirma que: “*The control chart is a graphical display of a quality characteristic that has been measured or computed from a sample versus the sample number or time.*”

As cartas de controlo foram desenvolvidas por Walter A. Shewart com o objetivo primordial de reduzir a variabilidade do processo, eliminando a existência de causas especiais provocadas por pequenos erros de operação, de maquinaria ou de pequenas variações na matéria-prima, suficientes para que o processo fique fora de controlo estatístico.

A escolha da carta de controlo faz-se em função do tipo de característica que se pretende observar. Se a característica for expressa numa escala contínua, como por exemplo o peso, dimensão ou temperatura, utilizar-se-ão cartas de controlo de variáveis; se a característica a medir não puder ser expressa numa escala contínua, como por exemplo, o nível de adesão do epoxy ao plástico ou o nível de contaminação das peças, então deverão ser utilizadas cartas de controlo de atributos. Na tabela seguinte apresentam-se as cartas de controlo, agrupadas por categoria [2].

Tabela 2.1 - Cartas de Controlo de Shewart

| Cartas de Controlo | |
|--|--|
| Variáveis | Atributos |
| Média e Amplitude : Carta X e Carta R | Proporção de unidades não conformes : Carta p |
| Média e Desvio Padrão : Carta X e Carta S | Número de unidades não conformes : Carta np |
| Média e Variância : Carta X e Carta S² | Número de defeitos : Carta c |
| Mediana e Amplitude : Carta X e Carta R | Número de defeitos por unidade : Carta u |
| Observações individuais e Amplitudes Móveis : Carta X e Carta MR | |

Assumindo que os valores da estatística w , seguem uma distribuição aproximadamente Normal $N(\mu_w, \sigma_w^2)$, Shewhart define as equações para o cálculo do limite superior e inferior de controlo, assim como para a linha central, por:

$$LSC_w = \mu_w + 3\sigma_w$$

$$LC_w = \mu_w$$

$$LIC_w = \mu_w - 3\sigma_w$$

onde, LSC, LC e LIC são respectivamente, o limite superior de controlo, o valor da Linha Central e o Limite inferior de controlo. Os limites de controlo de Shewhart estão portanto, localizados a $\pm 3\sigma_w$ da linha central. Na figura 2.1 está representada uma carta de controlo.

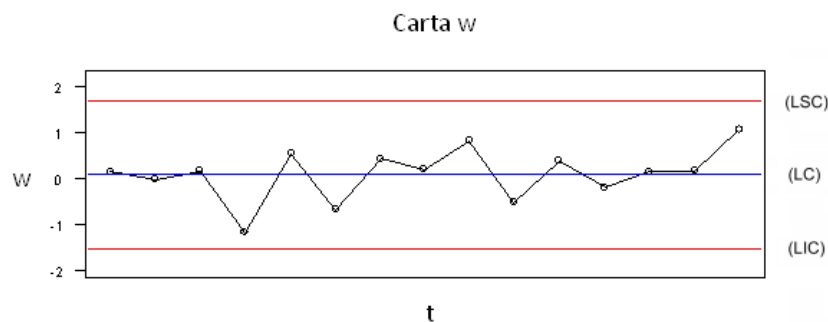


Figura 2.1 - Esquema de uma Carta de Controlo

Para w , normalmente distribuída, a probabilidade de um ponto da figura 2.1 estar localizado entre os limites de controlo é de 99,73%. Se um ponto sair fora dos limites de controlo mas pertencer à distribuição w , o valor de α associado a esse acontecimento é de 0,27%, ou seja, a probabilidade de se considerar que o acontecimento não pertence à distribuição da amostra, $N(\mu_w, \sigma_w^2)$, quando na realidade pertence [2].

No espaço temporal, a análise das amostras ou dos grupos de amostras de um determinado processo permanece maioritariamente na região sob controlo estatístico (99,73%), no entanto, e como é expectável, nenhum processo é eternamente estável, logo, sempre se verifique um acontecimento que provoque um desvio para fora dos limites de controlo, parte, ou no limite, todos os produtos nesse intervalo de tempo, encontrar-se-ão fora de controlo estatístico. Mohammed [5], indica que num processo maduro o valor de $\alpha=0,27\%$ corresponde, em termos médios, a 1 ponto fora dos limites de controlo em cada 370 observações, no entanto, só é possível de demonstrar numa simulação artificial.

Para se considerar um processo *dentro de controlo estatístico*, ou “processo sob controlo”, é necessário que todos os valores da estatística amostral a ser controlada estejam compreendidos entre as linhas LSC e LIC e apresentem um padrão aleatório. Contudo, existem exceções que dependem do padrão de distribuição ao longo do tempo e que podem levar a considerar o processo como “processo fora de controlo” mesmo quando todos os pontos se encontram compreendidos entre a LSC e a LIC. São os designados “Padrões não aleatórios”.

Segundo Lima [6], um processo estatisticamente estável deve reunir as seguintes condições: (1) não se devem verificar causas especiais durante um determinado intervalo de tempo, (2) os pontos na carta de controlo devem seguir uma distribuição aleatória em torno da linha central, (LC), sem que se verifique a ocorrência de padrões estranhos (não aleatórios) tais como tendências crescentes ou decrescentes, ciclos, estratificações ou misturas.

Pelo descrito, é de esperar que a análise de uma carta de controlo depende em parte do grau de experiência, sensibilidade e conhecimento de quem a analisa. Na fig. 2.2, é apresentado um exemplo de uma carta de controlo que à primeira vista se encontra sob controlo estatístico. Todos os 25 pontos estão dentro dos limites de controlo estabelecidos e existe variação crescente e decrescente, no entanto, uma análise mais pormenorizada indica que o padrão não apresenta características de aleatoriedade (comportamento sistemático). Verifica-se que 19 dos 25 pontos se encontram abaixo da linha central; do 4º ao 9º ponto, todos eles são crescentes (6 pontos consecutivos); do 18º ao 24º todos os pontos são decrescentes (7 pontos consecutivos). Este padrão crescente ou decrescente tem probabilidade mínima de ocorrência mas pode ser considerado como um fator decisivo na avaliação da estabilidade do processo, motivo pelo qual, a Western Electric, em 1956, desenvolveu regras para aumentar a sensibilidade das cartas de controlo. Foram definidas 8 regras de reconhecimento de padrões sistemáticos que indicam a ocorrência de causas especiais de variação [4].

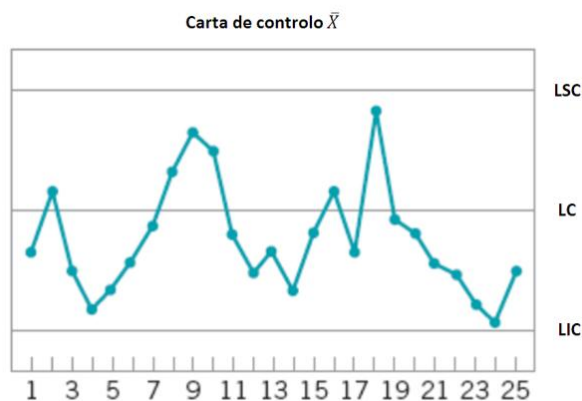


Figura 2.2 - Exemplo de algumas regras numa Carta de Controlo

[Fonte: Adaptado de [4]]

Montgomery [4] e Pereira e Requeijo [2], descrevem as 8 regras constantes na norma ISO 8258:1991 (agora revista na norma ISO 7870-1/2:2013) [7], com um intervalo compreendido entre $LC \pm 3\sigma_w$ dividido em seis zonas iguais, cada uma correspondente a $\pm 1\sigma_w$, $\pm 2\sigma_w$ e $\pm 3\sigma_w$ designadas, por Pereira e Requeijo [2], por A B C, C B A, como ilustrado na figura seguinte:

- Regra 1 – Um qualquer ponto fora dos limites de ação (ou seja, acima de A ($+3\sigma_w$), ou abaixo de A ($-3\sigma_w$);
- Regra 2 – Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C do mesmo lado da linha central;
- Regra 3 – Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente;

- Regra 4 – Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente;
- Regra 5 – Dois de três pontos consecutivos na zona A , do mesmo lado da linha central.
- Regra 6 – quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, do mesmo lado da linha central
- Regra 7 – Quinze pontos consecutivos na zona C acima e abaixo da Linha central
- Regra 8 – Oito pontos consecutivos em qualquer um dos lados da linha central, sem nenhum na zona C



Figura 2.3 - Regras da Western Electric

[Fonte: Adaptado de [2]]

Mohammed, refere no seu trabalho [5], que existe alguma controvérsia relativa a algumas das regras para análise das cartas de controlo de Shewhart, mas que três delas são bastante apreciadas por muitos autores: a regra 8, a regra 5 e a regra 3. No entanto, mesmo na aplicação destas regras, existem divergências entre autores; na regra 3, Pereira e Requeijo [2] e Montgomery [4] defendem que são 6 pontos, enquanto Mohammed [5] afirma que são 8 embora alguns autores utilizem 7. Na regra 5 os três autores estão de acordo. Na regra 8, Mohammed [5] e Montgomery [4] estão de acordo e Pereira e Requeijo [2] acrescenta "sem nenhum" ponto na zona C ($LC \pm 1 \sigma_w$)

Em situações em que o processo já está estável, a aplicação consecutiva e ou simultânea destas 8 regras pode conduzir a resultados inesperados, criando falsos alarmes, embora seja muito útil na fase 1 de implementação do SPC. Se não se pretender aumentar a sensibilidade da carta de controlo, não é necessária aplicação das 8 regras.

2.2.2 Introdução de Cartas num novo processo

Quando se pretende avaliar a estabilidade de um processo de modo a melhorá-lo ou quando se pretende verificar a estabilidade de um novo processo, deverão ter-se em consideração certos aspetos:

- Todos os intervenientes devem receber formação adequada de modo a poder compreender as vantagens do SPC e saber, corretamente, fazer a análise dos dados recolhidos.

- Antes do início da recolha dos dados é necessário averiguar a capacidade do equipamento de medição e a capacidade de medição, das pessoas que vão efetuar a recolha de dados.
- O equipamento de medição deverá ser o mesmo ao longo de todo o processo, bem como as pessoas que analisam o processo. De modo a minimizar as causas de variação, deve-se ainda proceder ao menor número de ajustes no processo e de preferência usar sempre o mesmo lote de matéria-prima.

Segundo Pereira e Requeijo [2], na fase I, deve-se selecionar o tipo de carta em função da estatística amostral e recolher m amostras de dimensão n durante um determinado período de tempo, até que $N = m \times n$, seja superior a 100. Montgomery [4] faz referência ao número de amostras m , que deve ser entre 20 a 25, no entanto não indica a dimensão n da amostra. Nesta fase, o objetivo é colocar o processo sob controlo estatístico, sendo os limites de controlo construídos com base nos dados recolhidos durante um determinado período de tempo. É por isso apelidada de “fase retrospectiva”.

Para construir uma carta de controlo deve-se em primeiro, selecionar a característica da qualidade, desenvolver o plano de controlo e selecionar o tipo de carta de controlo em função da característica que se vai medir. Em segundo lugar, recolher N observações ($N > 100$) e calcular os limites de controlo seguindo um método iterativo até eliminar todos os pontos fora de controlo estatístico, provocados por causas especiais de variação. O cálculo dos limites de controlo só pode ser feito tendo em conta as causas comuns de variação, isto porque, aplicando os princípios desenvolvidos por W. A. Shewart, se considera nesta fase que um ponto fora dos limites de controlo não pertence à distribuição da estatística que se está a controlar, são os erros do tipo I [2] [4].

Os limites de controlo da carta da Média e da carta da Amplitude são calculados com recurso a *software* de estatística ou através das seguintes equações propostas por [2]:

- Limites da Carta da Média

$$LSC_X = \bar{X} + A_2 R$$

$$LIC_X = \bar{X} - A_2 R$$

- Limites da Carta de Amplitude

$$LSC_R = D_4 R$$

$$LIC_R = D_3 R$$

Estando-se presente na Fase I, o valor estimado do desvio padrão do processo é dado por:

$$\sigma = R/d_2$$

Os limites de controlo estão localizados a $\pm 3\sigma$ da linha central.

Para uma amostra de dimensão n , para a Carta da Média, utiliza-se o Coeficiente A_2 para estimar o LIC e LSC . Para a Carta de Amplitude é utilizado o Coeficiente D_4 , para o cálculo do Desvio Padrão, σ , utiliza-se o Coeficiente d_2 .

Depois de todos os pontos se encontrarem sob controlo estatístico e estimados os parâmetros do processo σ e μ , é calculada a capacidade, através dos índices de potencial e de capacidade [4].

- Índices de capacidade do Processo

$$C_{pk} = \min C_{pk}_I, C_{pk}_S$$

$$C_{pk}_I = \frac{\mu - LIE}{3\sigma}$$

$$(C_{pk})_S = \frac{LSE - \mu}{3\sigma}$$

- Índice de Potencial do Processo

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

O processo tem potencial para cumprir a especificação técnica se $C_{pk} \geq 1,33$ (quando é bilateral), considerando-se centrado no valor nominal se $(C_{pk})_I = (C_{pk})_S$. Na indústria automóvel, dadas as exigências do mercado, da segurança dos ocupantes e da fiabilidade, um processo é considerado capaz se $C_{pk} > 2,00$.

2.2.3 Histograma

O histograma é uma representação gráfica de uma distribuição estatística na forma de um diagrama de barras. Na representação de uma amostra com uma determinada gama de valores, os intervalos (ou classes) são divididos de modo a que todas as classes sejam iguais. Segundo Montgomery [4], recomenda-se uma divisão entre 5 e 20 classes, na maioria dos casos, embora para casos excecionais o número de classes aumente com o tamanho da amostra. Hoje em dia, os *softwares* de estatística, como é o caso do *MinitabV16*, definem automaticamente os intervalos de cada classe em conformidade com os dados selecionados (resultados da amostra, tamanho da amostra e limites superior e inferior).

Num histograma o eixo horizontal representa a escala de valores e o eixo vertical representa o número de observações ou a sua frequência, possibilitando visualizar graficamente a distribuição dos dados, a sua tendência central e variabilidade.

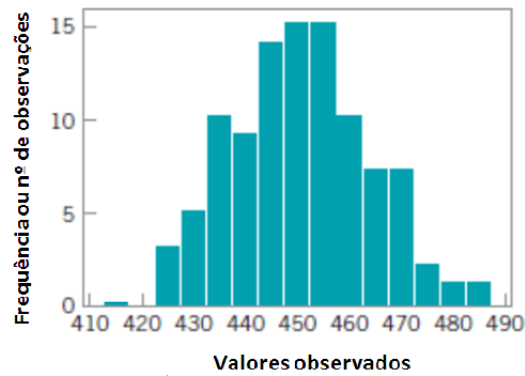


Figura 2.4 - Histograma com 15 classes.

[Fonte: Adaptado de [4]]

2.2.4 Distribuição de Probabilidade. A distribuição Normal

No histograma representa-se a distribuição dos dados da amostra recolhida dentro de um determinado intervalo de valores. A amostra é designada como uma coleção de dados ou medições que foram recolhidos de uma população de forma aleatória. Por exemplo, a amostra é o número de peças que se analisam por hora, retiradas de uma população composta pelas ignições produzidas numa linha de vazamento de *epoxy*.

A distribuição probabilística é um modelo matemático que relaciona a variabilidade do processo com a probabilidade de ocorrência de um determinado acontecimento aleatório e independente (condição necessária para o cálculo probabilístico). Existem dois tipos de distribuição (1) discreta, quando os parâmetros só podem adquirir certos valores, como por exemplo, a análise da impregnação do *epoxy* na ignição (0- falta de impregnação, 1-impregnado, 2-impregnação total), (2) contínua, quando pode assumir qualquer valor, como por exemplo, o *output* da peça no teste final. Na figura 2.5 seguinte estão representadas as distribuições de probabilidade mais conhecidas

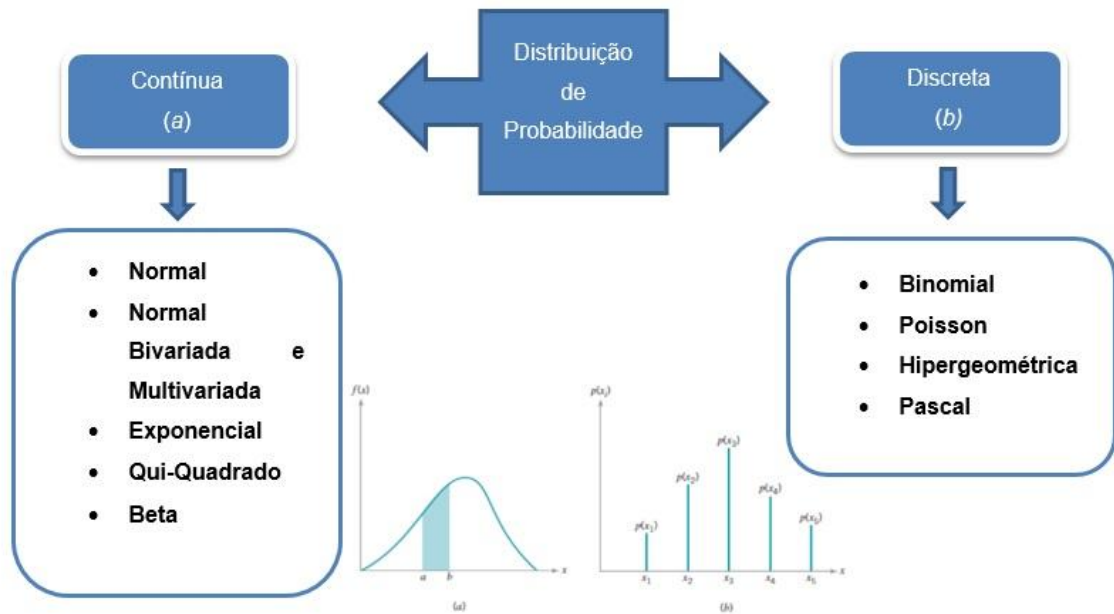


Figura 2.5 - Algumas distribuições contínuas e discretas

[Fonte: Adaptado de [4]]

A média μ de uma distribuição probabilística é análoga à média amostral de um histograma e por conseguinte, representa a tendência central da distribuição. É dada por,

$$\mu = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx, & x \text{ contínua} \\ \sum_{i=1}^{\infty} x_i p(x_i), & x \text{ discreta} \end{cases}$$

O valor de μ nem sempre corresponde a 50 % da distribuição, como exemplifica a figura 2.6. Em (a) o valor de μ é igual a 50% da distribuição; em (b) μ está deslocado, logo, o valor da mediana não é coincidente com o valor da média.

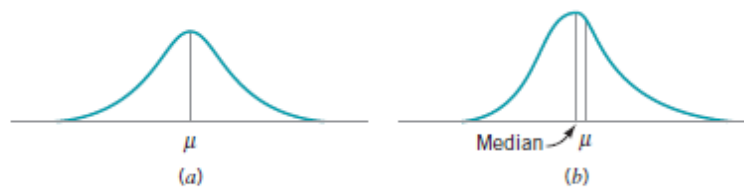


Figura 2.6 – representação gráfica da média e mediana (a) quando são coincidentes, (b) quando não coincidem.

[Fonte: Adaptado de, [4]]

A variância, σ^2 , representa a variabilidade de uma distribuição, cuja definição é dada por,

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2$$

Sendo o desvio padrão, mais uma vez, à semelhança do desvio padrão da amostra, dado por,

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2}{N}}$$

O desvio padrão σ , é o parâmetro estatístico que expressa a variabilidade de um conjunto de valores em relação ao seu valor médio. Quanto menor for o desvio padrão menor será a variabilidade [8].

A distribuição normal é a base das cartas de controlo, devido à relação existente entre o desvio padrão e a área sob a curva normal, em forma de sino, (ver figura 2.7), e é uma das distribuições mais usadas na gestão da qualidade [2]. A partir do valor nominal especificado, a relação entre desvio padrão e curva da normal verifica que a probabilidade de um acontecimento estar incluído num determinado intervalo, depende diretamente do desvio padrão:

- para um desvio padrão de 1σ , ou seja, de $\mu \pm 1\sigma$, a probabilidade de um acontecimento ocorrer é de 68,26%;
- para um desvio padrão de $\mu \pm 2\sigma$, a probabilidade de um acontecimento ocorrer é de 95,44%;
- para um desvio padrão de $\mu \pm 3\sigma$, a probabilidade de um acontecimento ocorrer é de 99,73%;

Segundo Barbosa [8], o nível sigma é uma métrica usada para indicar qual a capacidade do processo se realizar sem falhas. O nível sigma corresponde ao número de sigmas que cabem dentro do intervalo definido pelos limites de especificação. Na figura 2.7 está representado um processo 3 sigma e um processo 6 sigma. É possível observar que quanto maior o nível sigma, mais apertado é o controlo estatístico do processo e menos falhas são admitidas por milhão de peças produzidas. Na indústria automóvel os valores de C_p e C_{pk} têm de ser $\geq 2,00$ para que o processo seja considerado capaz.

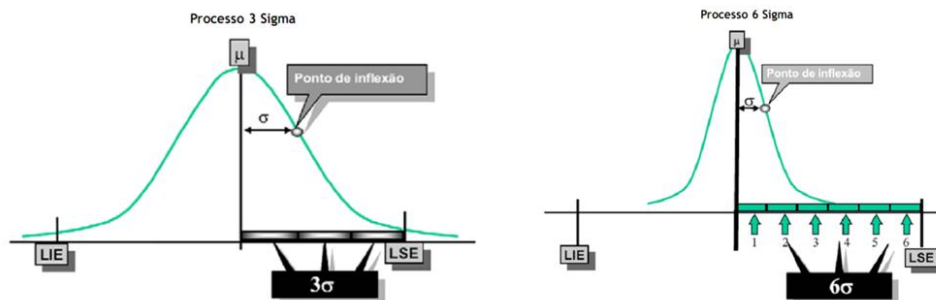


Figura 2.7 – Comparação entre processo 3sigma e 6 sigma

[Fonte: Adaptado de [9]]

2.3 Planeamento de experiências

O planeamento de experiências surge na década de 20 do século passado quando Sir Ronald A. Fisher inicia os primeiros estudos práticos com objetivos de comprovar as teorias científicas desenvolvidas no campo da agricultura para a cultura de cereais.

Igualmente designado por Desenho de Experiências, ou simplesmente por *DOE*, tem vindo a ser aplicado pelas organizações japonesas desde a década de 50 e 60. Por exemplo, A *Nippon Denso Company*, uma empresa fornecedora de material elétrico e eletrónico para a indústria automóvel Japonesa, relata que os seus engenheiros realizam mais de 4000 experiências por ano; já na Toyota uma centena de engenheiros recebe formação de 120 horas por ano em *DOE*. Estes factos são prova de que este método de controlo e melhoria da qualidade, quando bem assimilados e aplicados, tornam-se uma potente ferramenta. Nos EUA, as organizações descobriram as vantagens do *DOE* e começaram, por volta dos anos 80, a dar a devida atenção às melhorias da qualidade alcançados nos processos de fabrico. Tornou-se claro que a qualidade vende, reduz os custos e aumenta os lucros. Aumentando a qualidade sem aumentar o custo do produto cria novas oportunidades para reduzir os custos proactivamente. Por exemplo: em 1985 a FORD Motor Company obrigou todos os seus fornecedores a introduzirem o método de estudo estatístico *DOE* e em 1988 o Departamento da Defesa Americano sublinhou a importância do *DOE* no seu relatório anual [9].

Atualmente o *DOE* é utilizado no mundo inteiro em todo o tipo de indústrias e processos, dando provas concretas das suas vantagens, embora, se verifique ainda alguma resistência por parte dos engenheiros por ser uma ferramenta de análise estatística que requer tempo, dedicação, disciplina elevados conhecimentos e rigor; cujo tratamento dos resultados deve ser comprovado através do uso de outras ferramentas, como por exemplo, o método de análise de variância – *ANOVA*. Muitos justificam o seu “não-uso” devido a custos elevados, no entanto, se aplicado corretamente, o resultado traduzir-se-á em grandes benefícios económicos, devido ao aumento de qualidade com a redução da variabilidade do processo.

2.3.1 O Planeamento de experiências de Genichi Taguchi

Na forma mais simples o *DOE*, designado por “Desenho combinado” ou “*um-fator-de-cada-vez*”, tal como o nome sugere, consiste em fazer variar um fator de cada vez (mantendo os restantes fatores constantes), medindo a resposta provocada pela mudança de nível desse único fator. Este método é muito simples e de fácil aplicação, no entanto não é o mais eficiente na medida em que não se estuda a interação entre diferentes fatores a vários níveis e pelo facto de não variar mais do que um fator em simultâneo, o que se poderá traduzir num elevado número de experiências e tempo despendido [2] [9].

Segundo Montgomery [10], pode-se definir uma experiência (fig. 2.8) como um teste ou uma série de testes onde as variáveis de entrada de um determinado processo (ou sistema), são alteradas propositadamente de modo a que seja possível observar e identificar de que forma a alteração destes parâmetros influencia a variável de saída [10].

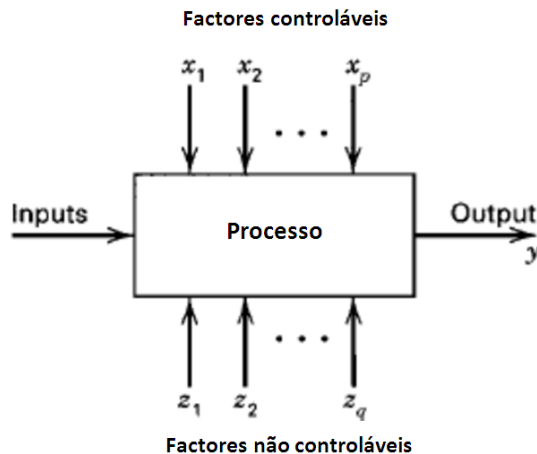


Figura 2.8 - Representação dos parâmetros de uma experiência

[Fonte: adaptado de [10]]

Os objetivos da experiência definem-se da seguinte maneira:

- Determinar qual ou quais os fatores de entrada X que mais influenciam a resposta Y
- Determinar quais os níveis desses fatores que conduzem a uma resposta Y mais próxima daquela que se pretende obter;
- Determinar quais os níveis de X que tornam a variabilidade Y menor;
- Determinar quais os níveis de X que minimizam os fatores de ruído;

Para melhor entendimento, é necessário definir algumas das terminologias usadas no *DOE*. Serão usados os conceitos segundo Montgomery [10] e Pereira e Requeijo [2]. Assim sendo:

Fatores de entrada (*inputs*) – são as variáveis de entrada no processo ou sistema e cujos valores influenciam a resposta do mesmo (*output*). No caso de serem controláveis, designam-se por *fatores controláveis* e podem ser alterados pelo indivíduo ou grupo de indivíduos que controla a experiência. Caso contrário, designam-se por *não controláveis* ou *ruído* (exemplo: *pressão atmosférica, temperatura ambiente*). O efeito da variação dos fatores controláveis provoca uma resposta (*output*) distinta no sistema. À variação destes fatores dá-se o nome de níveis.

Nível de um fator– O nível, é por assim dizer, o valor que o fator de entrada controlável assume. A variação do nível de um determinado fator provoca um efeito numa ou em mais respostas.

Efeito de um fator – é a alteração média observada na resposta do sistema quando existe mudança de nível de um determinado fator ou conjunto de fatores.

Resposta – é a característica do processo ou do sistema em estudo que se pretende avaliar. Depende da interação entre fatores de entrada e pode ser qualitativa ou quantitativa. É igualmente

um indicador de desempenho, uma vez que se procura atingir com a experimentação e com a variação dos fatores de entrada o rendimento mais elevado do processo.

Replicação – Entende-se por replicação, a repetição de uma experiência em condições análogas e espaçadas no tempo. Desempenha dois papéis fundamentais no desenho de experiências: (1) permite obter uma estimativa do erro da experiência; (2) se o valor médio da amostra for usado para estimar o efeito de um determinado fator no processo, a replicação permite obter uma estimativa mais precisa do efeito deste fator na resposta do processo. O valor da resposta não é medido na mesma experiência, mas sim em experiências diferentes. Para facilitar o entendimento desta designação, basta pensar que a replicação é a repetição da mesma experiência em dois dias diferentes.

Aleatoriedade - O princípio de aleatoriedade é um dos princípios mais importantes no uso de ferramentas estatísticas. A aleatoriedade estabelece que as experiências não deverão ser feitas seguindo uma ordem pré-estabelecida mas sim sem ordem, ao acaso. Os métodos de análise estatística preconizam que para uma observação ser considerada independente ou apresentar uma distribuição independente, o conceito de aleatoriedade deve estar presente.

Segundo Peace [9], Genichi Taguchi e o seu método de desenho experimental fraccionado assenta nos mesmos princípios que o *DOE* clássico, introduzindo duas alterações significativas:

1. A filosofia da qualidade que acompanha o método (Função-Perda) – 1ª alteração significativa;
2. A formulação matemática do desenho (fatorial fracionado) – 2ª alteração significativa;
3. Utiliza um método de controlo da qualidade “*off-line*”;

A teoria desenvolvida por Genichi Taguchi em torno do seu trabalho de planeamento e controlo da qualidade assenta no princípio da qualidade medida segundo a performance do produto. Segundo Taguchi, a engenharia da qualidade é “um sistema eficiente de gestão orientado para a minimização das perdas impostas à sociedade pelos produtos através de ferramentas de controlo *on-line* e *off-line da qualidade* [11]. Pereira e Requeijo, citam Genichi Taguchi em [2], “A qualidade de um produto determina-se pela perda económica imposta à sociedade a partir do momento em que o produto está pronto para ser distribuído.” Isto aplica-se a qualquer produto e significa que a performance pode estar ligada à resistência, ao tempo de resposta, ao sabor, à pressão, em suma, a qualquer característica que defina a qualidade do produto.

Taguchi pretendia assim, reduzir as causas de variabilidade e aumentar a robustez do produto através do controlo dos níveis dos fatores que o tornam insensível a variações externas de fatores não controláveis.

A ideia de desenvolver experiências sistemáticas de modo a gerar um melhor entendimento dos problemas e superar obstáculos não é nova, no entanto, Taguchi viu neste método do desenho de experiências, uma oportunidade para desenvolver uma metodologia eficiente, rápida e barata quando o Japão passava por enormes dificuldades no período pós guerra. Através das “*Taylor Expansion series*”, Taguchi desenvolveu um modelo matemático onde a perda monetária se reflete numa função quadrática, em função do desvio das especificações finais de um produto em relação ao objetivo que se pretende atingir no processo de conceção desse produto [12]. A essa função apelidou de Função-Perda ou na terminologia anglo-saxónica “*Loss-Function*” de Taguchi. Graças a esta função, os

desvios ao processo podem ser avaliados de forma muito mais palpável e emotiva, em perda monetária [9].

Pereira e Requeijo em [2], apresentam a equação da função de perda na sua forma mais simples:

$$L_Y = K(Y - y_0)^2$$

Onde,

$$K = \frac{A}{\Delta^2},$$

Sendo A, a perda de qualidade expressa em € e Δ a variação em relação ao valor nominal que se pretende obter.

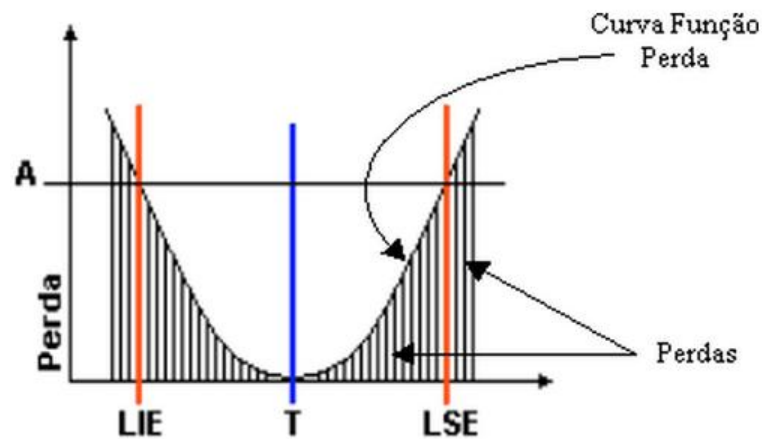


Figura 2.9 – Função-Perda de Taguchi

[Fonte: [2]]

Na figura 2.10 está uma outra representação da Função-Perda de Taguchi. Combinando a Função-Perda com a análise de capacidade, entende-se que quanto maior a variabilidade de um processo, maior a perda monetária para a organização, daí a necessidade de manter um processo sob controlo estatístico.

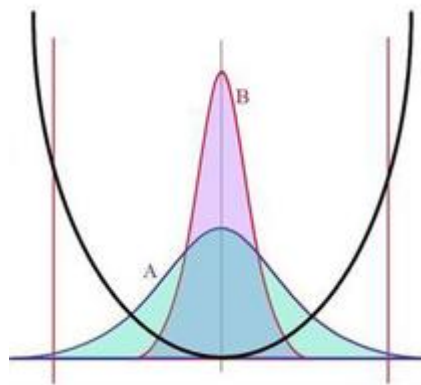


Figura 2.10 – Função-Perda de Taguchi. A perda em função da variabilidade do processo

O segundo ponto refere-se à adaptação do modelo clássico de desenho de experiências factorial. Taguchi utilizou o desenho factorial não apenas para medir os efeitos dos fatores na resposta do sistema, mas igualmente para medir as variações do valor médio na resposta, a variabilidade. A utilização de matrizes ortogonais (todos os vetores são linearmente independentes), permite a relação dos fatores da matriz, entre eles. A cada nível de cada fator correspondem todos os níveis dos restantes fatores em igual número de vezes, o que permite criar uma experiência equilibrada e isolar o efeito de um fator do efeito dos restantes. O resultado final é uma matriz de experiências que pode ser reproduzível, ou seja, é possível efetuar a mesma experiência sob condições semelhantes mas em ocasiões distintas. A reprodutibilidade, permite eliminar fontes de variação aleatórias como, erros de operação, erros de *setup* do equipamento, condições atmosféricas diferentes (humidade e pressão), etc.. Outra vantagem do uso de matrizes ortogonais é o binómio custo-benefício, ou custo-eficiência por permitir eliminar parte das combinações de fatores sem haver perda de informação vital. Por exemplo, numa matriz L_8 , poderão ser estudados um máximo de 7 factores num total de 8 experiências [9] [2].

Embora este sistema de análise seja aparentemente simples por comparação direta com o *DOE* tradicional, é necessário um conhecimento elevado sobre a matéria para interpretar corretamente os resultados das experiências e suas replicações.

O último ponto, controlo da qualidade “*off-line*”, é outro dos pontos-chave da filosofia seguida por Genichi Taguchi a qual apelida de “*Quality Engineering*”, traduzindo, Engenharia da Qualidade. Esta filosofia engloba uma série de atividades com objetivo de melhorar continuamente a qualidade, resolvendo os problemas de forma rápida e económica, e divide-se em duas categorias: controlo “*off-line*” e controlo “*on-line*”. Na figura seguinte está representada a divisão de cada categoria [9].

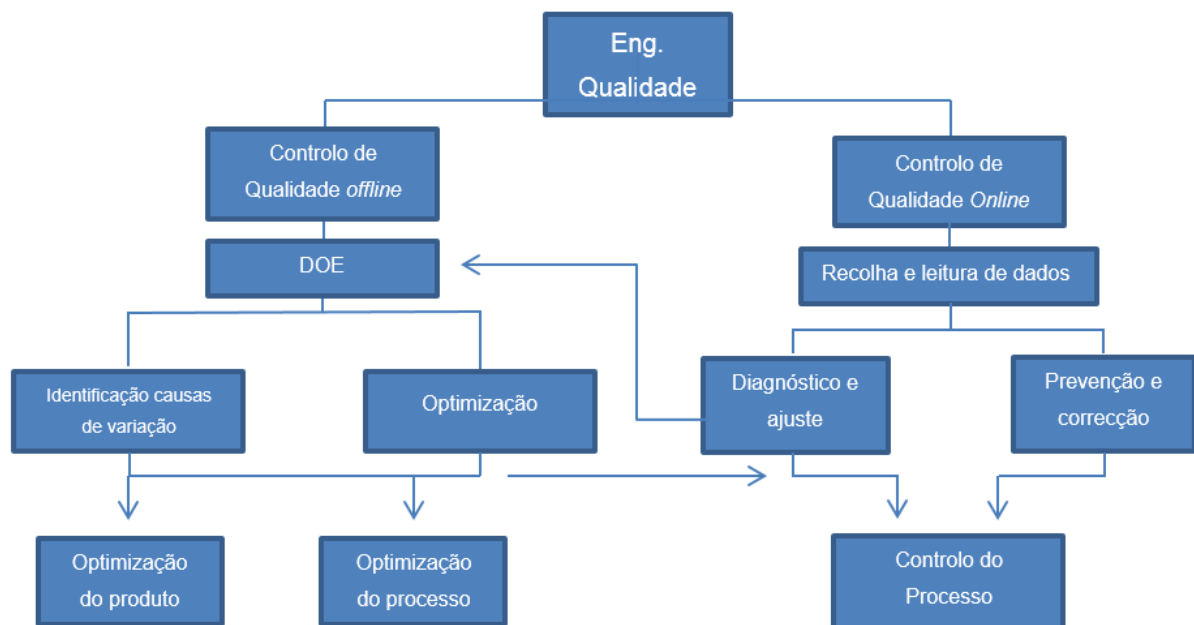


Figura 2.11 – Engenharia da Qualidade Categorias do controlo da qualidade

[Fonte: [9]]

Analisando a figura 2.11, distinguem-se as principais diferenças entre as duas categorias:

- O controlo *on-line* é feito na fase de produção e na linha de produção. Tem como objetivo monitorizar o processo, criando alertas para potenciais problemas e fornecendo informação necessária para acionar ações corretivas que eliminem desvios ao processo. A informação é recolhida em tempo real ou em curtos intervalos de tempo pré-definidos [9].
- O controlo *off-line* (em oposição), está vocacionado para a conceção, desenvolvimento e otimização de produtos e processos robustos fora da linha de produção: em laboratório ou na fase de implementação da linha.

No entanto, o controlo *off-line* não está dissociado do controlo *on-line*, dando suporte, por exemplo, na otimização de produtos e processos, onde o desenho de experiências é uma ferramenta chave, desempenhando um papel fundamental na identificação das fontes de variação e na otimização. Ao identificar os fatores (e seus níveis), que provocam desvios ao processo (causas de variação), possibilita o ajuste do nível desses fatores na linha de produção, eliminando as causas de variação no controlo de qualidade *on-line* [9].

A otimização “*off-line*” segue uma sequência de eventos composta por 3 importantes fases:

1. Desenho do sistema
2. Desenho de parâmetros
3. Desenho de tolerâncias

Segundo Peace em [9], na fase inicial de conceção de um novo projeto surgem numerosas ideias proveniente da experiência, da imaginação e conhecimento de todos os seus participantes. É necessário organizar as ideias e convertê-las em algo funcional, de modo a permitir o desenvolvimento de novos produtos e processos, consistentes.

O desenho de parâmetros tem como objetivo trabalhar todas as ideias da primeira fase que têm potencial de ser exequíveis e melhorá-las. A ferramenta utilizada para atingir os objetivos do desenho de parâmetros é o *DOE*. A estratégia associada ao desenho de parâmetros deve ter em linha de conta a maximização da poupança com o *focus* de reduzir a variabilidade sem aumentar custos. As experiências devem começar por ser realizadas da mais barata para a mais dispendiosa de maneira a fazer o “melhor” com o “menor”.

Na última fase, pretende-se analisar as tolerâncias do processo e quais os níveis que provocam maior variabilidade ao processo. Nesta fase as tolerâncias podem ser apertadas e os materiais ajustados de modo a identificar a solução mais vantajosa entre ambos.

2.3.2 Metodologia do Desenho de Experiências de Taguchi

O Desenho experimental requer uma abordagem sistemática preliminar de forma a garantir que a sua aplicação produz resultados consistentes. Segundo Peace em [9], esta abordagem deve incluir as seguintes fases de execução:

- Planeamento
- Desenho
- Execução
- Análise

A primeira fase engloba a seleção da equipa, o desenvolvimento preciso dos objetivos e a justificação económica do estudo. É necessário definir o planeamento, as características da qualidade que vão ser identificadas, os valores da resposta, os fatores e os seus níveis.

Na fase de desenho é desenvolvido o *layout* da experiência, selecionando a matriz que melhor se adapta ao número de experiências que se pretende realizar tendo em consideração o número de fatores e o número de níveis desses fatores que se pretende estudar de modo a tornar o planeamento o mais eficiente possível.

Na fase de execução, o planeamento é seguido de acordo com o preconizado na fase de desenho. São feitos os preparativos e a coordenação das pessoas envolvidas no *DOE*, de modo a conduzir a experiência da maneira mais simples e no menor intervalo de tempo possível. Nesta fase determina-se qual o método para testar a resposta obtida. Se o *DOE* não for bem executado, os dados recolhidos poderão ser considerados não fidedignos e a experiência será considerada inválida, resultando em perda de tempo e dinheiro para a organização [9].

2.3.4 Desenhos Fatoriais com 3 Fatores a 3 Níveis

As matrizes utilizadas para estudar 3 níveis são denotadas de matrizes 3^n , onde n representa o número de fatores que se pretendem estudar. A mais simples é a L_9 , onde o 9 representa o número de experiências, N , realizadas na matriz L_N . Permite estudar até um total de 4 fatores a 3 níveis cada e acomodar até um máximo de 8 graus de liberdade (2 graus por coluna).

Tabela 2.2 – Matriz L_9 de Taguchi

| Experiência | P1 | P2 | P3 | Erro |
|-------------|----|----|----|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 |

Os graus de liberdade designam a quantidade de informação relevante que pode ser obtida de cada *item* em estudo, ou seja, o número de comparações entre fatores e seus níveis que é necessário realizar de modo a determinar qual ou quais os melhores níveis que permitem obter a melhor resposta. Um exemplo prático é a comparação entre o comprimento de dois lápis usados. Basta uma comparação para entender qual o maior. Se tivermos três lápis basta comparar dois deles para se chegar a uma conclusão válida, e se houver quatro lápis, são necessárias três comparações, ou seja, são necessários $N-1$ lápis (analogia a fatores) quando se pretende avaliar apenas uma resposta.

Um exemplo de uma matriz mais complexa é a $L_{27}(3^{13})$ que permite estudar até 13 fatores e representa um total de 27 experiências (índice, $N=27$ em L_N), figura 2.. Como em todas as matrizes de Taguchi, por serem ortogonais torna possível substituir algumas colunas por colunas de interação entre fatores, estudando assim menos fatores e mais interações, embora Taguchi privilegie o estudo dos fatores isolados.

| Experiment | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 8 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 13 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 17 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| 18 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 20 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 23 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 24 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| 25 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 27 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 |

Figura 2.12 – Matriz L_{27}

[Fonte: website]

Mas o que é afinal a ortogonalidade de uma matriz? Segundo Peace em [9], em termos práticos, ortogonalidade significa equilibrado mas não misto. No contexto das matrizes experimentais ortogonalidade significa estatisticamente independente. Se se analisar uma matriz ortogonal, por exemplo a matriz $L_9 3^4$, verifica-se que cada nível aparece o mesmo número de vezes em cada coluna e isto aplica-se a todas as matrizes, independentemente do seu tamanho. Esta matriz é muito eficiente quando se pretende efetuar um número reduzido de experiências, pois permite tratar os dados resultantes de uma quantidade relativamente pequena de experiências e retirar conclusões significativas e objetivas.

2.3.5 Índice Sinal/Ruído numa Análise do Tipo “Nominal-o-Melhor” (Nominal-the-Best)

O índice-sinal ruído é uma medida de desempenho do processo e representa a sua variabilidade. Este índice resulta da derivada da função-perda, logo, a sua maximização resulta na minimização da função. O índice S/N (siglas anglo-saxónicas para Signal/Noise), pode ser calculado independentemente de terem ou não sido incluídos fatores de ruído no desenho experimental e é definido de acordo com o tipo de característica que se pretende estudar [2].

Para as características estáticas do tipo Nominal-o-melhor (Tipo N), resulta:

$$(S/N)_i = 10 \log \left(\frac{Y}{S_i^2} - \frac{1}{n} \right) \text{ dB}$$

Onde,

$(S/N)_i$ – índice Sinal-Ruído, em dB, da experiência $i=1, \dots, N$

n – número de observações para cada experiência

Se n for relativamente elevado e igual para todas as experiências, $(S/N)_i$, é dado por

$$(S/N)_i = 20 \log \left(\frac{Y}{S_i} \right) \text{ dB}$$

2.3.6 Análise de Variância - ANOVA

A ANOVA ou Análise de Variância é o método estatístico utilizado para detetar as fontes de variação do processo, uma a uma, e atribuir a cada uma delas, um valor estimado do seu peso (ou contribuição) na variação total do processo. Pode ser utilizada em inúmeras aplicações, desde o controlo *on-line* em rotinas de verificação do processo ou verificação de dados de manutenção, até ao controlo *off-line* na execução de Desenhos de Experiências [13]

No Desenho de Experiências, a análise de variância de respostas que são variáveis contínuas pode ser feita para a média das observações e/ou para o índice Sinal-Ruído e considerando, ou não, a introdução de fatores de ruído. Desta forma torna-se possível analisar quais os fatores que têm mais influência na resposta que se está a medir e que pode ser muito útil na decisão da escolha dos níveis de cada fator. Por exemplo, se houver um fator pouco significativo, cujo melhor nível aumente significativamente o tempo de ciclo do processo, poderá optar-se, mediante juízo absoluto, por um outro nível que seja mais favorável.

Na Análise de Variância interessa conhecer:

- o efeito do fator X para n observações, onde n é o número de observações para cada combinação dos fatores controláveis;
- A contribuição dos fatores ou da interação entre fatores na variação total;

Pereira e Requeijo apresentam em [2], algumas equações que definem a Análise de Variância para um desenho fatorial fracionado de *Taguchi*, simples. Para o efeito do Fator X, apresentam a equação:

$$\text{Efeito do Factor } X = \frac{X_2 - X_1}{\frac{N \times n}{2}}$$

$$SS_x = \frac{(X_2 - X_1)^2}{N \times n}$$

Onde,

N – número de experiências (índice da matriz)

n – número de observações para cada combinação dos fatores controláveis

$X_2 - X_1$ – as somas dos valores das respostas para os níveis 2 e 1 do factor X (caso mais simples em que X só tem dois níveis);

Quando se trata da resposta de S/N, existe apenas um índice por experiência e $n=1$. Para avaliar a significância de um fator X, determina-se a razão entre as variâncias conhecida e desconhecida de acordo com a seguinte equação,

$$F_0 = \frac{MS_x}{MS_{Erro}} = \frac{SS_x}{g.l. \times MS_{Erro}}$$

onde,

F_0 – F de Fisher ou teste F (distribuição contínua F)

MS_{Erro} – Variância Residual

$g.l. \times$ – graus de liberdade do factor X

SS_x – variação do factor X

A percentagem de contribuição de um fator ou de uma interação é dada por,

$$\rho_x = \frac{SS_x - g.l. \times MS_{Erro}}{SS_T}$$

Onde,

ρ_x – contribuição percentual do factor X

SS_T – Variação Total

A contribuição do erro é determinada pela diferença entre 100% e a soma das contribuições percentuais dos efeitos significativos na tabela de análise-de-variância. Um valor reduzido do erro significa que a experiência foi bem conduzida.

3. Caracterização da Delphi, do Processo e da Matéria-Prima

3.1 Caracterização da Delphi

A Delphi foi criada pela norte-americana General Motors (GM) como **Automotive Components Group** e mais tarde renomeada para **Delphi Automotive Systems**. Apesar de ter sido criada pela GM, incorporou, numa fase posterior, outros segmentos industriais, tal como a **Delco Electronics**, controlada pela *Hughes Defense*.

É líder global no mercado em que atua, sendo a maior fornecedora de produtos eletrónicos e tecnológicos para o mercado automóvel. Operando nos maiores e mais especializados centros técnicos, possui fábricas e instalações de apoio ao cliente em mais de 32 países. Presente em Portugal desde 1981, detém neste momento três fábricas, sendo uma delas a Delphi Seixal.

A visão da Delphi passa por garantir excelência nos vários produtos que oferece ao consumidor, assegurando a satisfação do mesmo através dos elevados níveis de qualidade que praticam. Seguem uma filosofia 6 Sigma, isto é, a melhoria contínua e sistemática dos processos através da eliminação de defeitos, como é vista na sua forma tradicional. Porém esta metodologia é vista também como uma prática de gestão, que se encontra associada a altos níveis em termos de retorno financeiro. A aplicação desta metodologia acarreta um valor agregado para a Delphi, no sentido em que permite a otimização dos processos da empresa, através da redução contínua na variação dos processos na eliminação de defeitos ou falhas nos produtos, como sumariamente supracitado.

3.2 Processo de Vazamento de Epoxy

O presente trabalho foi aplicado na linha de vazamento e cura ignições com resinas epoxy. Um equipamento de vazamento e cura de resinas *epoxys* é constituído por dois componentes: forno e câmara de vazamento. Na câmara de vazamento o *epoxy* é vazado no interior das peças e nos fornos as peças são pré-aquecidas e após o vazamento, o *epoxy* é curado. O processo desenvolve-se em três estágios:

1. As peças são pré-aquecidas (pré-aquecimento)
2. As peças são vazadas (vazamento)
3. As peças são curadas (cura)

Pré-aquecimento - No pré-aquecimento as peças são aquecidas até uma temperatura máxima de 150°C para garantir que todas as impurezas são volatilizadas e que são eliminados quaisquer vestígios de humidade presentes nos componentes, sendo posteriormente arrefecidas até uma temperatura próxima da temperatura de vazamento. A eliminação de vestígios de humidade, de outras impurezas e o pré-aquecimento até à temperatura de vazamento, evita o borbulhar do material

devido ao choque térmico entre *epoxy* e ignição e promove uma boa impregnação e fluidez do material durante o vazamento.

Vazamento - A parametrização do vazamento depende de muitos fatores. É necessário garantir um nível de vácuo estável e com pressões muito próximas dos 0 mBar (0.5~0.9 mBar) , garantir uma razão estequiométrica entre os componentes e ainda uma boa mistura entre eles. É necessário verificar se a temperatura do material está dentro de especificação, bem como a quantidade vazada em cada ciclo, e garantir que o material se encontra totalmente desgasificado. Se estas condições não se verificarem poderá haver falta de impregnação, vazamentos incorretos ou peças salpicadas com *epoxy*.

Cura - O processo de cura é gradual e faz-se a temperatura constante ao longo das várias zonas do forno com diferentes *set-points*. O processo inicia-se com a geleificação do material a uma temperatura próxima da temperatura de vazamento para que o processo de impregnação iniciado no interior da câmara de vazamento se complete lentamente e se inicie o processo de adesão aos diferentes componentes da ignição. O perfil de cura vai aumentando gradualmente ao longo dos diversos estágios ou zonas, até se atingir a temperatura máxima de cura onde o material adquire as suas propriedades mecânicas (resistência, dureza, etc.).

3.3 Caracterização das resinas *epoxy*

As resinas *epoxy* são polímeros termoendurecíveis que se apresentam tanto sob a forma de líquidos de baixa viscosidade como sob a forma de sólidos, antes de serem curados através da sua reação com agentes de cura ou endurecedores à base de *Hidroxilo, carboxilo, amina e grupos aminas*. Apresentam propriedades químicas e físicas únicas, permitindo uma enorme flexibilidade de aplicações quando comparadas com outros materiais, o que potencia a sua aplicação em indústrias tão distintas como a indústria aeroespacial (proteção de componentes eletrónicos) e indústria alimentar (embalagens, revestimento de superfícies), ou indústria automóvel (ignições, plásticos) e construção (vedantes), etc.. Podem ser formuladas (combinação com outros compostos), para apresentar excelente aderência, resistência a agentes químicos, a elevadas temperaturas, capacidade dielétrica e propriedades mecânicas, como elevada dureza e resistência a impactos, flexibilidade [14].

O produto final de um *epoxy* resulta da mistura entre a resina, também designada por componente A, e endurecedor, componente B, que quando combinados em quantidades estequiométricas permitem uma cura eficiente do composto. Algumas resinas usam uma relação 1:1 (A:B), enquanto outras se obtêm num rácio C:D (ex: 100:30;100:27). Quando tal se verifica, o componente A é sempre aquele que existe em maior quantidade. O componente A, devido à sua formulação, confere as propriedades físicas e químicas do composto enquanto o componente B é primeiramente responsável pelo processo de cura (tempo e taxa de reação, temperatura de cura, viscosidade), e em segundo, pelas

propriedades finais [14]. A mistura dos dois componentes designa-se vulgarmente por resina *epoxy* ou simplesmente *epoxy*, termo que será usado daqui em diante.

A escolha de um *epoxy* para vazamento numa câmara sob vácuo requer que sejam considerados aspetos relacionados com as características do material, do processo e com as condições de operação do produto final. Karl S. Medinger em [15], descreve um método de seleção de *epoxys* para ignições, após anos de experiências em laboratório com diferentes matérias-primas formuladas para diferentes tipos de aplicações. A base do estudo é o *design* da ignição, e portanto, o autor toma em consideração fatores como a temperatura de operação, o tipo de bobine do secundário (alta tensão), os materiais de construção, o coeficiente de expansão térmica dos diferentes materiais e os parâmetros de processo caso se trate de uma alteração de melhoria da qualidade.

As ignições funcionam com elevadas diferenças de potencial (na ordem dos 30~40kV), o que requer que o *epoxy* apresente uma elevada resistência dielétrica, mecânica e térmica, um reduzido coeficiente de expansão térmica, *CET* (de modo a ser próximo ao *CET* do plástico do *spool* da bobine), reduzida viscosidade à temperatura de vazamento e elevada estabilidade (reduzida pressão de vapor), quando submetido a uma atmosfera sob vácuo (de modo a não evaporar). A reduzida viscosidade do *epoxy* permite a adição de fibras (a mais comum é a sílica), aumentando a sua resistência mecânica. O Dr. Werner Hollstein escreveu um artigo sobre a aplicação de resinas termoendurecíveis no encapsulamento do estator de motores elétricos devido às suas propriedades térmicas, físicas e químicas e valorizando as vantagens destes materiais no desenvolvimento de novos motores [16]. Ging-Ho Hsiue fez uma investigação sobre a combinação de *epoxys* contendo silicones com diferentes agentes de cura, com o objetivo de aumentar a capacidade de resistência térmica do *epoxy*; concluindo que a combinação de *epoxys* contendo silicone com endurecedores do grupo das diaminas retarda em 42% o ponto de inflamação do *epoxy* [17].

Na escolha do endurecedor deve ser tomada em conta a viscosidade e o seu peso equivalente de maneira que o composto apresente reduzida viscosidade, o que irá potenciar a impregnação nas condições de vazamento no interior da câmara de vácuo [15]. À semelhança das resinas, também o endurecedor pode conter a adição de fibras. Geralmente adicionam-se fibras quando o volume da ignição é muito grande ou quando o *epoxy* não está protegido numa cavidade.

3.4 Cura de *epoxys*

O processo de cura, a par do processo de vazamento (devido à quantidade de parâmetros envolvidos), é um dos processos críticos da operação de vazamento sob vácuo, de ignições. A definição do perfil de temperatura é uma das questões chave na obtenção das características físicas, mecânicas e funcionais. No processo de cura, a evolução da viscosidade é a principal preocupação dos engenheiros para a obtenção de uma boa adesão e impregnação do *epoxy* no fio do secundário (ou bobine de alta tensão), e a temperatura nos diversos estágios, na obtenção de boas propriedades mecânicas. Isto, porque a diferença de potencial entre duas espiras pode ser muito elevado e é necessário haver um isolamento eficaz. Como o *epoxy* é um bom dielétrico (mau condutor), uma boa

impregnação, adesão e resistência mecânica bastam para evitar que a corrente “salte” de uma espira para outra. A corrente procura sempre o “caminho mais curto” entre o potencial mais elevado e o potencial mais baixo ou nulo (Terra) e nas ignições a diferença de potencial é criada pela rápida passagem da corrente ao longo de uma bobine com milhares de espiras, isoladas umas das outras. No final do caminho percorrido existe um polo com o potencial máximo, separado do polo de descarga com potencial nulo (0V). Na bancada de ensaio, o intervalo entre os dois polos é estabelecido de acordo com o potencial que se pretende obter, ou seja, se se pretender um potencial mais baixo, o *gap* entre os dois polos é mais curto e o contrário também é válido. É claro que o potencial também depende do número de espiras, mas existe um intervalo de valores do qual o *gap* é responsável. Num automóvel o potencial da ignição é controlado eletronicamente para que a variação de potencial entre disparos seja aproximadamente constante ao longo do tempo. As propriedades mecânicas são importantes para que o comportamento da ignição não varie quando submetida a elevados regimes (rotações muito elevadas), elevadas temperaturas de operação e para que apresente um tempo de vida útil muito elevado.

Para compreender a influência da temperatura na cura do *epoxy*, Maksimiljan Mvravljak [18], selecionou 3 *epoxys* diferentes e analisou o tempo que cada um levou até atingir o ponto de geleificação, t_g , e de vitrificação, t_v , quando curados a diferentes temperaturas, constantes. Para determinar o t_g e o t_v comparou as curvas do *módulo de energia armazenada*, G' , e do *módulo dissipativo*, G'' , chegando à conclusão de que são inversamente proporcionais à temperatura de cura. F. Teyssandier conduziu um estudo onde analisou a viscosidade dinâmica de resinas termoendurecíveis com diferentes perfis isotérmicos [19], concluindo que a variação da viscosidade diminui com o aumento da temperatura de cura bem como o tempo de geleificação, t_g . A geleificação química (irreversível) dá-se no momento em que o *epoxy* passa do estado líquido para um estado viscoelástico e a vitrificação, quando passa para o estado sólido, concluindo-se o processo de cura. H. H. Winter em [20], também analisou a evolução das curvas G' e G'' para temperaturas de cura muito inferiores à temperatura de transição vítrea, ou *Glass Transition Temperature*, T_g , de modo a distinguir em que classes de *epoxys* termoendurecíveis se pode utilizar o método de determinação da t_g e da t_v através das curvas G' e G'' . A T_g é a temperatura na qual um *epoxy* termoendurecível, no estado sólido, perde rigidez e começa a apresentar maior flexibilidade [21]. A T_g , define algumas das características do *epoxy* depois de curado, tais como a capacidade de dissipar o calor, a flexibilidade e a resiliência. Quanto mais elevada for a temperatura de cura, maior a T_g , logo, maior a capacidade de manter as suas propriedades a temperaturas mais elevadas. J. Macan liderou um estudo [22] comparativo entre a cura de compostos em razões estequiométricas e não-estequiométricas, concluindo que os compostos com uma mistura estequiométrica apresentam uma T_g superior quando curados com o mesmo perfil de temperatura, isto porque o grau de cura é mais elevado, ou no limite, igual a 1 (total). Ao mesmo tempo comparou a cura de um *epoxy* a uma temperatura isotérmica e não-isotérmica, concluindo que quando curado com um perfil isotérmico, o T_g , é mais elevado por promover a reacção entre os dois compostos. Também o Dr. Naja J. Salah, verificou em [23] que a velocidade das reacções aumenta com a temperatura, bem como o T_g e o grau de cura do *epoxy*. Witold Brostow afirma que o processo de cura depende fortemente do tempo, t , temperatura, T , e

combinação da resina e endurecedor (tal como J. Macan, [22]), numa razão estequiométrica. Para Witold Brostow, qualquer alteração num dos parâmetros provoca uma grande variação no produto final. Desta forma, elabora um estudo amplo com o objetivo de prever o processo de cura de resinas termoendurecíveis com base nos parâmetros de cura variáveis tempo e temperatura (as quantidades do composto A e composto B não variam durante o processo de cura) [24]. F. Teyssandier conduziu um estudo onde analisou a viscosidade dinâmica de resinas termoendurecíveis com diferentes perfis isotérmicos [19], concluindo que a variação da viscosidade ao longo do tempo e que o tempo de geleificação diminuem com o aumento da temperatura de cura, isotérmica.

Nas ignições é extremamente importante conhecer a evolução da viscosidade ao longo do tempo, de modo a estabelecer qual o tempo de permanência em cada zona do forno e qual a temperatura de cura do *epoxy* nas diferentes zonas. Para isso são efetuados estudos em laboratório, onde amostras de material são colocadas num banho e com um viscosímetro é medida a evolução da viscosidade a temperatura constante, figura 3.1.

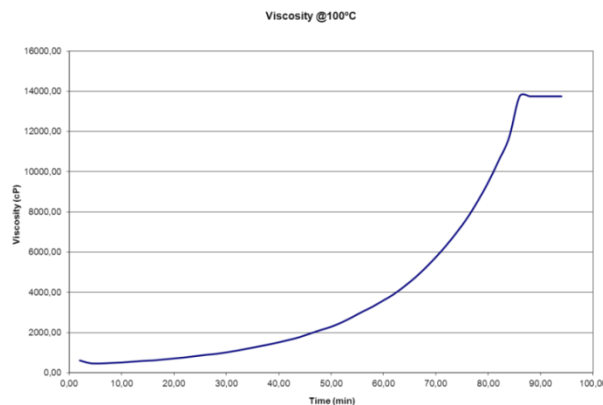


Figura 3.1 – Evolução da viscosidade do Epoxy quando curado a uma temperatura constante.

No desenvolvimento de um novo processo, o guia escrito por Karl S. Medinger [15], é muito útil na compreensão e na orientação ao longo das demais etapas. De igual modo, o estudo conduzido por Maksimiljan Mvravljak [18], sobre a influencia da temperatura de cura nas propriedades reológicas dos *epoxy* ajuda a entender a variação de G' e G'' , bem como a redução do t_g e da t_v com o aumento da temperatura de cura. A reologia é a ciência que estuda o comportamento dinâmico dos fluidos(ou líquidos) e semifluidos. O G' , diz respeito às propriedades elásticas do material, enquanto o G'' descreve as propriedades viscosas. Outro estudo que se revelou muito interessante para a compreensão de todo o processo de cura das ignições foi o estudo conduzido pelo Professor Doutorado em física e química Witold Brostow [24], sobre a influência da temperatura e tempo de cura. Não serão aplicadas as equações desenvolvidas pelo autor mas o grosso do trabalho será útil para a compreensão do trabalho realizado por Maksimiljan Mvravljak [18].

A diversidade de estudos realizados até hoje em torno das resinas *epoxy* é muito vasta e justifica-se com a heterogeneidade de aplicações que este tipo de composto permite. Os *epoxys* estão presentes em quase todos os objetos que usamos no dia-a-dia, desde a bancada da cozinha aos talheres de plástico, desde o telemóvel até ao automóvel, todos apresentam componentes que usam *epoxy* no seu fabrico.

4. Metodologia Aplicada

A implementação de um novo equipamento requer uma série de experiências e testes de modo a definir os parâmetros de processo que permitem produzir com máxima qualidade. As ferramentas de planeamento e controlo estatístico de processos são úteis na definição de novos processos e têm vindo a ser largamente utilizadas na indústria. Uma das ferramentas, o desenho de experiências de Genichi Taguchi permite, através de uma metodologia baseada na matriz ortogonal, estimar quais os níveis dos fatores em estudo que melhor satisfazem as características da qualidade do produto final.

As cartas de controlo e Histograma permitem avaliar se o processo é capaz, ou seja, se consegue produzir dentro de especificação e com elevada confiança, e se pequenos desvios não afetam o processo, ou seja, se é estável.

Este trabalho engloba um estudo de capacidade para o sistema de vazamento, uma aproximação ao Desenho de Experiências clássico na sua forma mais simples para avaliação de uma característica qualitativa na seleção do melhor perfil de temperatura de cura e um estudo desenvolvido segundo a filosofia de Genichi Taguchi para o Desenho de experiências, mais conhecido como *DOE* de Taguchi.

4.1 Controlo Estatístico de Processo - SPC

O controlo estatístico do processo é aplicado à Fase I, fase de implementação de um novo processo e engloba o estudo da capacidade do sistema de medição, dos reservatórios e dos injetores.

O controlo estatístico do processo na introdução do novo equipamento de vazamento inicia-se com um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade, estudo *R&R*, efetuado com o aparelho de medição e pessoas intervenientes. É necessário aferir se o equipamento tem capacidade para responder às exigências da experiência e se os operadores são capazes de efetuar as medições. São para isso, selecionadas 10 amostras de material que serão pesadas por três operadores em três séries de medições, de forma alternada. A análise das cartas de controlo dos dados recolhidos no estudo *R&R* deve garantir que a variabilidade do sistema de medição é desprezável em relação à variabilidade total do processo de vazamento.

A etapa que sucede ao estudo *R&R* é a análise do rácio de mistura resina e endurecedor. Para 100 partes de resina, correspondem 29 partes de endurecedor (100:29). A estequiometria do composto é extremamente importante para a qualidade final das peças. Nesta etapa, 50 amostras material são retiradas diretamente dos reservatórios de resina e endurecedor, de modo a garantir que a quantidade de material retirada é exatamente aquela que é despendida pelo êmbolo do reservatório.

Para analisar a capacidade do processo da *Potter Huebers2665* são vazadas 50 paletes, o que corresponde a 200 amostras por injetor. Tal como na avaliação da capacidade dos reservatórios, procura-se através das cartas de controlo e do histograma, garantir que o processo é estável e capaz.

4.1.1 Gage RR

Foram selecionadas 10 amostras de material e três operadores compostos por elementos da equipa de engenharia, manutenção e produção. O equipamento a ser aferido é uma balança Metler Toledo, modelo ICS425 com capacidade para pesar até 3,100 Kg e uma resolução de 0,001 gramas.



Figura 4.1 – Equipamento de medição utilizado no SPC – Balança Metler Toledo ICS425

Para determinar a sequência de medições foi utilizada uma tabela matriz construída automaticamente pelo *software MinitabV16*. Neste capítulo são apresentadas as tabelas referentes à primeira replicação. As restantes tabelas matriz são apresentadas no anexo A.

Tabela 4.1 – Ordem de execução do primeiro grupo de pesagens do estudo *R&R*

| Pesagem | Operador | Amostra | Valor medido | Pesagem | Operador | Amostra | Valor medido | Pesagem | Operador | Amostra | Valor medido |
|---------|----------|---------|--------------|---------|----------|---------|--------------|---------|----------|---------|--------------|
| 1 | Paulo | 2 | 25,365 | 11 | Luis | 5 | 25,705 | 21 | José | 6 | 25,557 |
| 2 | Paulo | 3 | 25,648 | 12 | Luis | 9 | 25,661 | 22 | José | 7 | 25,647 |
| 3 | Paulo | 8 | 25,703 | 13 | Luis | 8 | 25,704 | 23 | José | 9 | 25,646 |
| 4 | Paulo | 10 | 25,726 | 14 | Luis | 4 | 25,774 | 24 | José | 10 | 25,734 |
| 5 | Paulo | 6 | 25,554 | 15 | Luis | 7 | 25,648 | 25 | José | 3 | 25,648 |
| 6 | Paulo | 1 | 25,713 | 16 | Luis | 6 | 25,553 | 26 | José | 2 | 25,376 |
| 7 | Paulo | 7 | 25,643 | 17 | Luis | 2 | 25,370 | 27 | José | 5 | 25,704 |
| 8 | Paulo | 5 | 25,698 | 18 | Luis | 1 | 25,714 | 28 | José | 4 | 25,773 |
| 9 | Paulo | 9 | 25,648 | 19 | Luis | 10 | 25,726 | 29 | José | 1 | 25,710 |
| 10 | Paulo | 4 | 25,777 | 20 | Luis | 3 | 25,635 | 30 | José | 8 | 25,714 |

Os resultados das medições foram tratados com o *MinitabV16*.

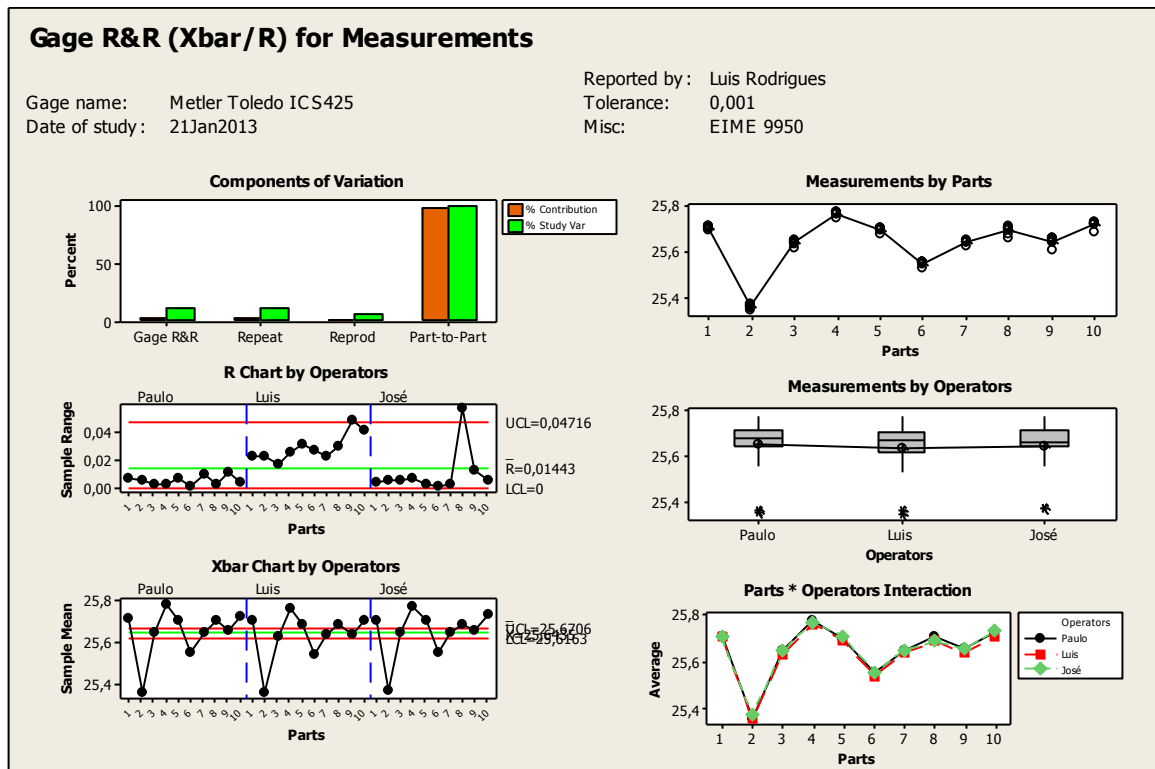


Figura 4.2 – Análise do Estudo R&R com dados tratados no *Software MinitabV16*

Verifica-se que a maior parte da variação é devido à diferença de peso entre as 10 amostras de material. As variações devido ao equipamento e à repetibilidade são insignificativas.

4.1.2 Análise da capacidade de vazamento dos reservatórios

O estudo da capacidade de vazamento dos reservatórios irá fornecer informação importante para o próximo estudo, o da análise de vazamento do equipamento *Huebers2665*. Uma análise preliminar garante que com um índice de capacidade do processo superior a 2, o epoxy é vazado na camara numa razão estequiométrica.

Na base de casa reservatório encontra-se uma válvula de 3 vias que permite permutar a saída de material para a câmara de vazamento ou para um reservatório exterior. O funcionamento da válvula de 3-vias está esquematizado na figura 4.3 .

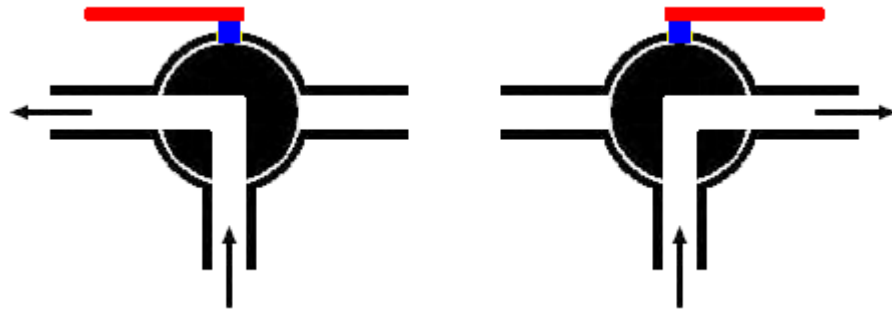


Figura 4.3 – esquema de funcionamento da válvula de 3-vias

Um êmbolo ligado à válvula de 3-vias determina a quantidade de material dispensado em função do seu curso. De modo a averiguar a capacidade do êmbolo para dispensar pequenas e grandes quantidades de material, foram retiradas 50 amostras de cada reservatório para cada tipo de deslocação do êmbolo (pequenas e grandes deslocações), o que perfaz um total de 200 amostras. Os devidos ajustes foram realizados sempre que a quantidade dispensada excedeu os limites de especificação estabelecidos pelo fabricante do equipamento e o estudo iniciado novamente. Na figura 4.4 está esquematizado o procedimento de recolha das amostras de material e o tempo de duração de cada atividade, exceto para a atividade de intervenção técnica cujo tempo de operação é variável.

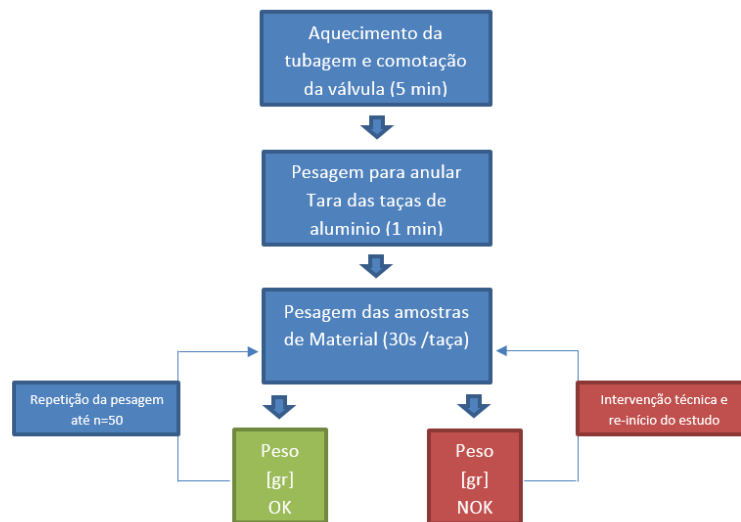


Figura 4.4 – procedimento de preparação e recolha de amostras de material

Após a recolha de cada grupo de 50 amostras de resina e endurecedor, recorreu-se ao *MinitabV16* para executar o estudo de capacidade do processo. Na figura seguinte está exemplificada a análise feita pelo *software* para uma amostra de dimensão $n=50$ de endurecedor com 50.0 ± 0.5 gramas de material. Para o estudo foi apenas considerada a regra 1 (pontos fora dos limites de controlo). O *MinitabV16* constrói as cartas \bar{X} e M , utilizadas nas observações individuais.

Pela análise da figura 4.5 é possível verificar que existe um ponto fora de controlo (amostra nº1) e que necessita de ser eliminado para que todos os pontos fiquem sob controlo estatístico. Eliminando o ponto e analisando novamente a capacidade do processo para $n=49$, é possível verificar que todos os pontos se encontram agora dentro de controlo estatístico, como se pode ver na figura 4.6.

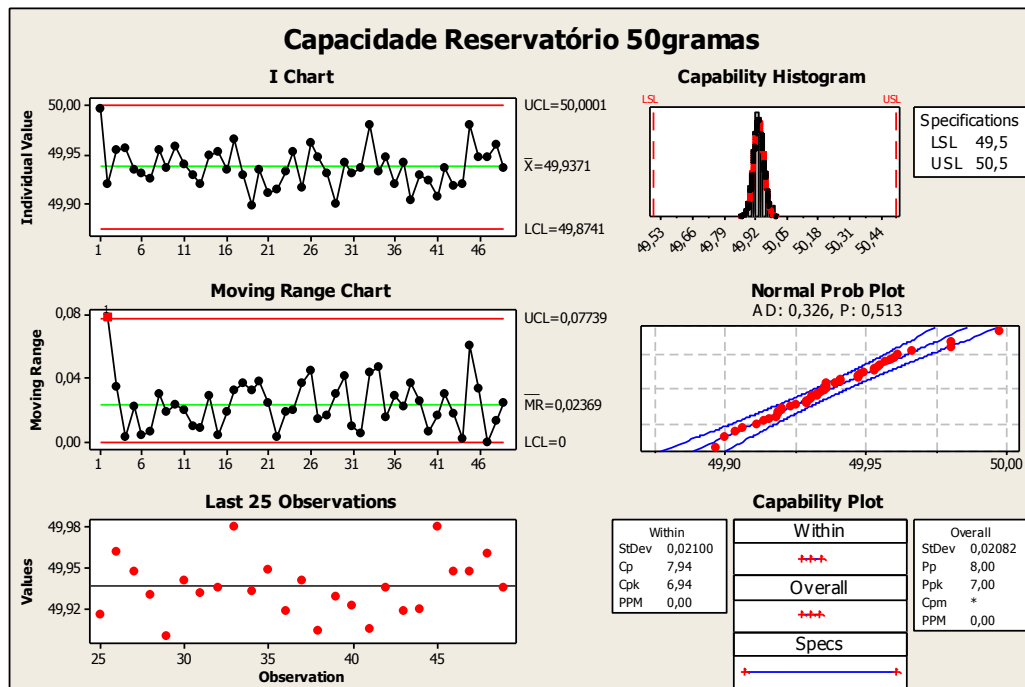


Figura 4.5 – Análise da capacidade do equipamento feita pelo MinitabV16 – 1 ponto fora dos limites de controlo

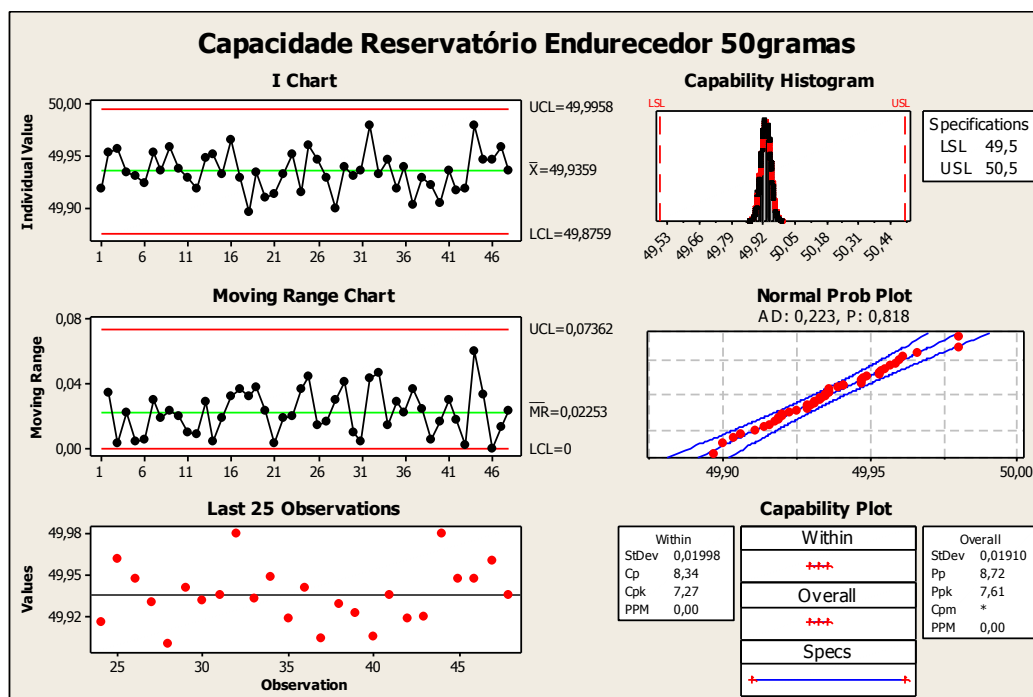


Figura 4.6 – Análise da capacidade do equipamento feita pelo MinitabV16 – 1ª iteração. Nenhum ponto fora dos limites de controlo.

Agora é possível verificar a capacidade do reservatório do endurecedor. O valor de $C_p = 8,34$, e o valor de $C_{pK} = 7,27$ muito superior a um $C_{pk} = 2,00$ (condição necessária na industrial automóvel), o que significa que, mesmo com um pequeno desvio (ideal seria centrado, $CP = C_{pK}$), a probabilidade de ocorrência de uma falha é inferior 0,002 em 1000000 de peças produzidas e que o aparelho tem capacidade para produzir de acordo com os padrões de qualidade da Delphi. Os resultados referentes aos restantes estudos de capacidade encontram-se no próximo capítulo.

4.1.3 Análise da capacidade de vazamento dos Injetores

Com o objetivo de analisar a capacidade de vazamento dos seis injetores da câmara de vazamento em cada uma das suas duas posições relativas à paleta, vazaram-se 50 paletes, o que corresponde a um total de 200 vazamentos por injetor em cada posição. A quantidade de material vazada em cada injetor tem impacto na altura de material na ignição. Se houver uma variação no peso de vazamento, mesmo que na ordem de 1,00 grama, pode ser suficiente para ter peças derramadas, +1,00 grama, ou vazamentos baixos, -1,00 grama.

Para reduzir o erro, foi necessário pesar os 4000 copos disponíveis para efetuar o estudo e agrupá-los por peso. O intervalo de variação do peso dos copos estava compreendido entre 1,45 grama e 1,51 grama (figura 4.7). Em cada vazamento apenas poderiam ser usados copos da mesma classe (figura 5.8).



Figura 4.7 – copos agrupados por peso.

Antes de iniciar o Teste de capacidade da câmara de vazamento foram vazadas 10 paletes, pesadas as amostras, feitos os devidos ajustes e registadas todas as intervenções. Após ajustar os parâmetros e vazamento, iniciou-se o ensaio. Durante o ensaio, quando se vazava a 23ª paleta danificou-se um vedante (O'ring), foi efetuada uma intervenção de manutenção corretiva e deu-se continuidade ao ensaio por a intervenção não ter alterado os parâmetros de vazamento.



Figura 4.8 – Palette preparada para ser vazada.

Na figura 4.9 está representado o procedimento de execução da análise de capacidade como tempo médio gasto em cada atividade.

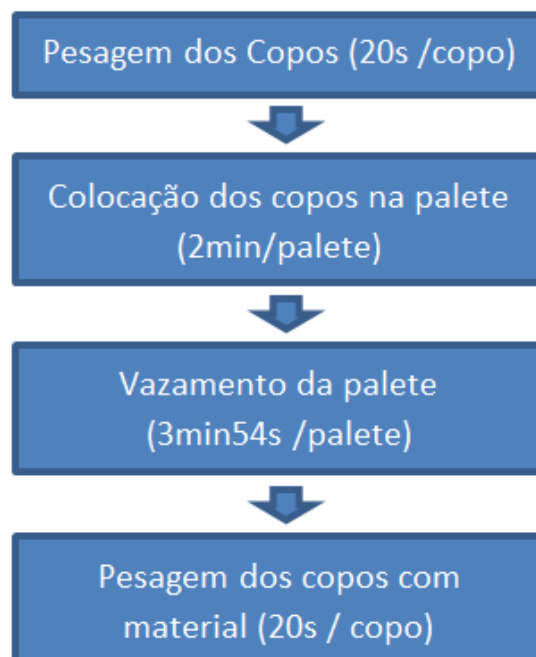


Figura 4.9 – Procedimento de execução da análise da capacidade dos injetores.

Concluído o ensaio, analisou-se a capacidade do vazamento aplicando as fórmulas sugeridas por [2]. Os dados foram colocados numa folha Excel, agrupados em filas e por sua vez em subgrupos de 4 (cada palette tem 12x4 filas). Foi calculada a média e a amplitude da amostra por injetor e por fila, criadas as cartas de controlo da média e amplitude e através de um método iterativo, eliminados todos os pontos que se encontravam fora de controlo nas cartas.

Para o cálculo dos limites de controlo do processo foi utilizada a tabela A.3, presente no Anexo A.

. Limites da Carta da Média

$$LSC_X = \bar{X} + A_2 R$$

$$LIC_X = \bar{X} - A_2 R$$

. Limites da Carta de Amplitude

$$LSC_R = D_4 R$$

$$LIC_R = 0$$

Como nos encontramos na Fase 1, o desvio padrão estimado é dado por:

$$\sigma = R/d_2$$

Os limites de controlo estão localizados a $\pm 3\sigma$ da linha central.

Para uma amostra de dimensão $n=4$, para a Carta das Médias, foi utilizado o Factor Limite de Controlo $A_2 = 0,729$ para estimar o LIC e LSC ; Para a Carta das Amplitudes foi utilizado o Factor Limite de Controlo $D_4 = 2,282$; Para o cálculo do Desvio Padrão, σ , foi utilizado o Factor Limite de Controlo $d_2 = 2,059$. Todos os valores foram retirados da Tabela III.1, presente em [2] pp. 729.

Serve de exemplo o estudo efetuado para o Injetor 1 na posição 1.

Foram colocados os dados numa folha MS-Excel e verificou-se que existia 1 ponto fora de controlo na carta das médias (\bar{X}) e dois pontos na carta das amplitudes (R), como se pode verificar na figura 4.10.

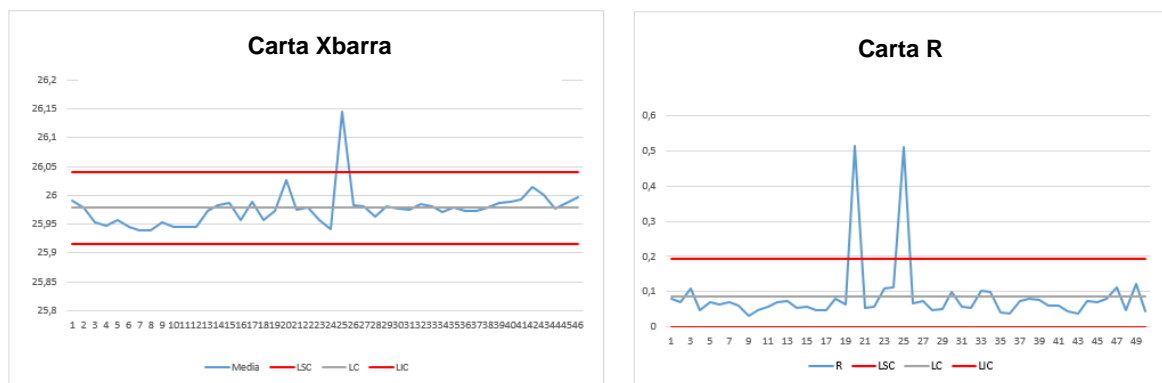


Figura 4.10 – (à esquerda) carta de controlo \bar{X} , (à direita) carta de controlo R . Primeira análise.

Na tabela 4.2 é apresentado o valor dos pontos que se encontravam fora de controlo.

Tabela 4.2 – Pontos fora de controlo na primeira análise dos resultados da amostra.

| Carta | LIC | LC | LSC | Ponto | Valor |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \bar{X} | 25,92 | 25,98 | 26,04 | 25 | 26,15 |
| R | 0 | 0,085 | 0,194 | 25 | 0,510 |
| | | | | 20 | 0,513 |

De modo a poder estudar a capacidade do injetor 1 na posição 1, é necessário eliminar os pontos fora de controlo através de um processo iterativo.

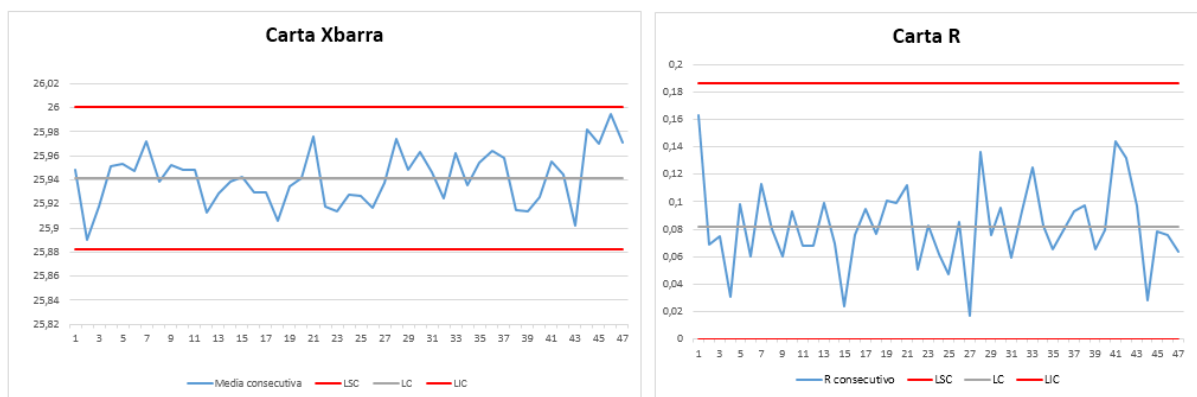


Figura 4.11 – Carta de controlo após primeira iteração – todos os pontos encontram-se dentro de controlo estatístico.

Como se pode observar, pela análise da carta de controlo, o processo já não apresenta pontos fora dos limites e controlo, pelo que se pode obter a estimativa dos parâmetros de processo μ e σ . Houve variação nos limites de controlo das cartas. Os novos valores estão representados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Limites de controlo e valor estimado de μ e σ .

| Carta | LIC | LC | LSC |
|-----------|-------|-------|-------|
| \bar{X} | 25,92 | 25,97 | 26,02 |
| R | 0 | 0,07 | 0,15 |

Foi apenas considerada a regra 1 na identificação de padrões proposta na norma [7] para avaliar a estabilidade do processo, logo, pode-se considerar que o processo se encontra sob controlo estatístico. Neste momento já é possível avaliar a capacidade do processo através das fórmulas apresentadas a montante. Na figura 4.12 estão representados os valores de CP, C_{pk}, C_{pkS}.

| CAPACIDADE Injector 1 Posição 1 | | | |
|---------------------------------|------|-------|------|
| CP = | 5,09 | | |
| Cpki = | 4,83 | CpK = | 4,83 |
| CpkS = | 5,36 | | |

Figura 4.12 – Índice de Capacidade do equipamento *Huebers2665* para o injetor 1 na posição 1

O valor de CP para o injetor 1 na posição 1 é de 5,09 >> 1,67 e CpK = 4,83 >> 2,00 numa análise de curto prazo, logo o processo é considerado capaz, mas com um pequeno desvio, para o injetor 1 na fila 1.

Os resultados relativos aos restantes injetores e posições serão apresentados no capítulo 5. Todos os dados relativos ao ensaio podem ser encontrados no anexo A.

4.2 Desenho de Experiências

A componente experimental deste trabalho referente ao desenho de experiências, engloba um método “empírico” e um método científico. O método “empírico” foi utilizado para estudar a temperatura de cura do *epoxy* enquanto o método científico, adotando uma filosofia de Genichi Taguchi para o Desenho de Experiências Factorial, foi realizado para analisar o tempo de permanência em cada zona do forno.

4.2.1 Equipamentos e produtos envolvidos no desenho de experiências.

A preparação e realização do desenho de experiências é feita tanto em ambiente laboratorial como em ambiente industrial e com recurso a diversos equipamentos que serão enunciados pela ordem em que foram utilizados.

4.2.1.1 Viscosímetro

O viscosímetro utilizado pertence ao laboratório de ignições, é do fabricante *Brookfield*, modelo TC-502, fig.4.13. Este modelo é composto pelo viscosímetro e por uma cuba de imersão com um controlador de temperatura programável que permite operar numa gama de temperaturas entre os -20°C e os 200°C com uma resolução de 0.01°C.

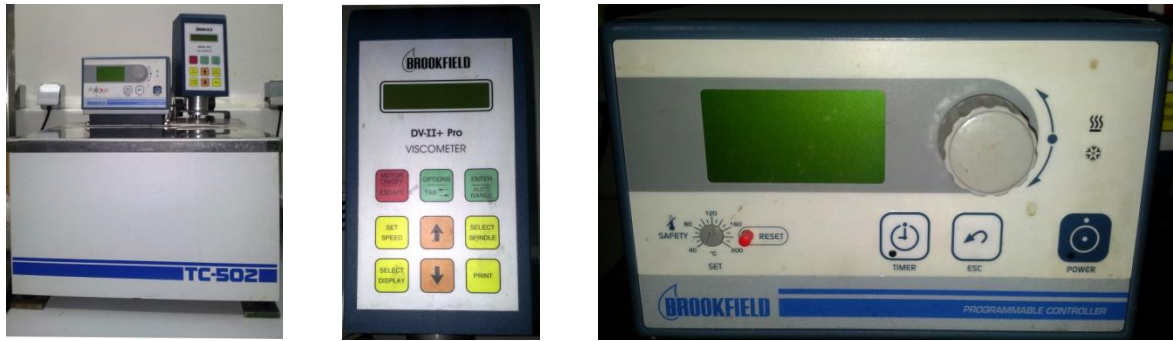
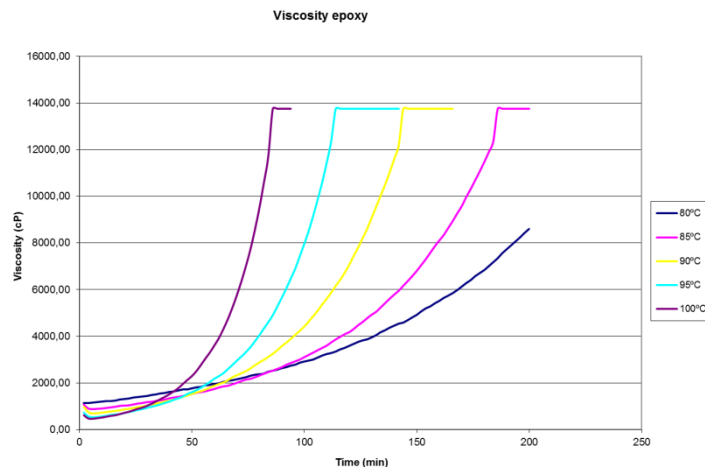


Figura 4.13 – Viscosímetro Brookfield TC-502

O viscosímetro rotativo mede a força de fricção do material num disco em rotação embebido no *epoxy*. O *epoxy* estabilizado num banho, a uma determinada temperatura vai aumentando a sua viscosidade ao longo do tempo provocando um aumento do atrito dinâmico entre o disco e o material. A força necessária para rodar o disco a uma velocidade constante é traduzida pelo aparelho, em centipois, cP, ou mPa.s, unidade de medida da viscosidade. Os resultados são apresentados graficamente em função do tempo e da temperatura, como se pode verificar na figura 4.14.

Figura 4.14 – Evolução da viscosidade do *epoxy* curado em diferentes perfis isotérmicos

4.2.1.2 Forno de Sample Build

No laboratório utilizou-se um forno *Linderberg* da série *Blue M* com um controlador *Pro-550* (fig. 4.15). Este forno é do tipo “*Box Oven*”, tem a particularidade de permitir aquecer ou arrefecer com elevada rapidez e com grande estabilidade. Com o controlador *Pro-550* consegue-se simular um perfil de temperatura de um forno de produção e assim curar as peças num ambiente muito próximo do real. Este aparelho foi utilizado para curar as peças com diferentes perfis de temperatura na fase de preparação do *DOE*.



Figura 4.15 – Forno de laboratório – “Box Oven”

4.2.1.3 Fornos Shuang&Yeong

O *DOE* foi executado em três fornos industriais verticais *Shuang&Yeong* (fig. 4.16). Os fornos têm uma potência de 320Kw (total), podem atingir uma temperatura máxima de 160°C e curar até 1920 peças em simultâneo. Cada forno é constituído por duas zonas distintas, equipadas com um sistema de transporte por correntes e um termóstato independentes. As paletes deslocam-se dentro do forno em tabuleiros, na vertical, e a passagem da primeira zona para a segunda é feita com auxílio de um “*pusher*”, um braço mecânico que empurra a paleta quando esta se encontra no topo do forno. Estes fornos foram utilizados para pré-aquecer as peças e para curar as peças com diferentes tempos de cura durante o *DOE*.

Figura 4.16 – Fornos industriais da *Shuang&Yeong*

4.2.1.4 Dataloggers

Os dataloggers utilizados são da marca Ebro, modelo *EBI-125A* com capacidade de medição na gama de temperatura dos -40°C aos 400°C com escudo de proteção e até 140°C sem escudo, com uma resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ (fig. 4.17). Para o estudo foram utilizados escudos de temperatura Ebro EBI ID-114x160 com capacidade para permanecer até 95min a uma temperatura de 180°C . Os dataloggers permitiram registar o perfil de temperatura durante as experiências.



Figura 4.17 - Dataloggers

4.2.1.5 Equipamento de Teste das ignições (Teste Final)

O teste final é fabricado pela Sintek, é do modelo PXI-1000 B – SLOT 3U e é constituído por vários módulos (fig. 4.18):

- Ni PXi – 6508, 96 CH. Dio ModuleB
- Ni PXI 6025 ED
- Ni TB - 2605 Multiplexing Terminal
- Ni PXi - 5112 16MB Per Channel SCO
- Ni PXi – 4060 Digital Multimeter
- Computador atual – Ni PXi – 8176 Windows 2000 NT

Este equipamento está preparado para testar diferentes produtos e recorre a um *software* de gestão *Labview8.2* que funciona em ambiente *Windows2000 NT*. Os resultados dos testes efetuados são recolhidos numa base de dados própria e podem ser consultados utilizando o MS Excel. Neste equipamento foram testadas as ignições e medido o seu *output* em kV (*kiloVolts*).



Figura 4.18 – Teste final. (à esquerda) medição do *output*(kV), (ao centro) disparo em aberto, (à direita) *software LabView8.2* para registo de dados

4.2.1.6 Equipamento de medição de laboratório

Em caso de falha de alguma ignição, serão corridos testes no laboratório de ignições de modo a perceber qual a origem da falha. Para testar as ignições no laboratório, é utilizado um osciloscópio *Tektronix TDS3014B* que mede a corrente no primário e o *output* no secundário. Para disparar as peças é utilizada uma “*switch box*” e uma vela de ignição de um automóvel ligada à terra (fig. 4.19).

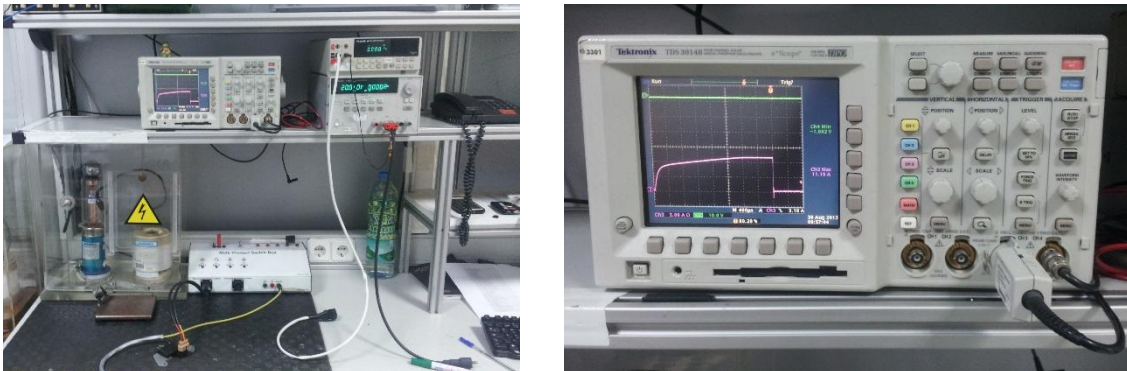


Figura 4.19 – (à esquerda) “switch-box”, (à direita) osciloscópio *Tektronix TDS3014B*

4.2.1.7 Equipamento termográfico

O laboratório está igualmente equipado com equipamento de visão infravermelha. A câmara termográfica permite identificar os pontos de aquecimento nas ignições. Quando existe uma falha num determinado sector da bobine, verifica-se um aquecimento exagerado da peça na zona da falha. Recorrendo à termografia é possível identificar, e marcar com exatidão a zona onde se originou essa falha. Foi utilizada uma câmara termográfica *Termo Trace TS7302* da MIKRON (fig. 4.20). Na imagem seguinte é possível ver o ponto de aquecimento numa ignição que falhou no teste de disparo.

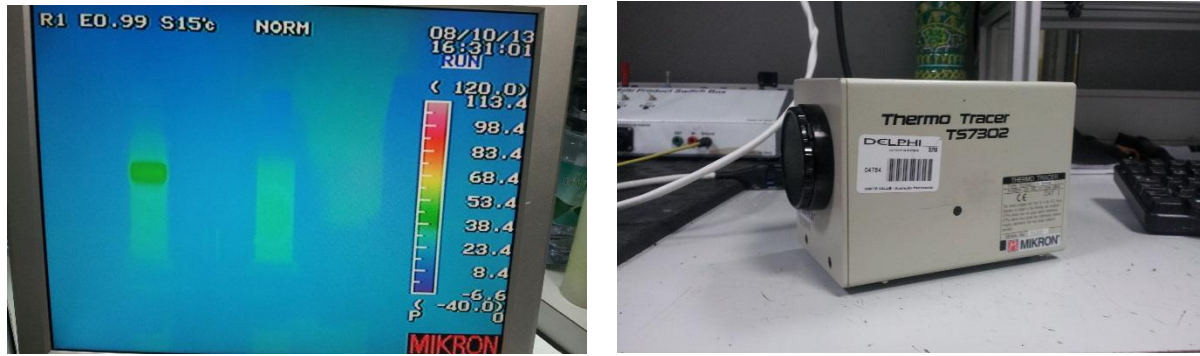


Figura 4.20 – (à esquerda) imagem de ignição em sobreaquecimento, (à direita) camara termográfica *Thermo Tracer*

Na ignição onde existe uma falha, consegue-se distinguir uma zona “verde-escuro” onde a temperatura é mais elevada (fig. 4.20, lado esquerdo). Quanto mais “quente” for a cor (na escala de cores visíveis o azul é o mais frio e o vermelho o mais quente), mais quente estará a peça.

Após identificar a zona de aquecimento excessivo, marca-se a zona da peça e analisa-se a bobine do secundário nessa mesma zona.

4.2.1.8 Ignições *Opel PDA*

As ignições testadas são do tipo “pencil coil”, por se assemelharem a lápis. As ignições destinam-se ao cliente General Motors e todo o processo de fabrico e montagem é feito na Delphi Seixal. O *pencil coil* é composto pela case, à esquerda na figura 4.21, pelo primário, no centro e pelo secundário, à direita. O primário é alimentado pela bateria do automóvel com um potencial de 12V e encontra-se inserido no interior do secundário, que por sua vez se encontra inserido na case. Quando o primário se encontra alimentado a corrente e o potencial são máximos no primário e nulos no secundário; quando se dá o corte de corrente, o campo eletromagnético provocado pela diferença de potencial de 12V para 0V no primário, induz uma corrente no secundário, que provoca um aumento de potencial até cerca de 40kV, com uma corrente muito reduzida. Esta corrente é posteriormente descarregada na vela do automóvel provocando a ignição. O *epoxy*, impregnado entre os fios das duas bobinas, impede que a corrente faça curto-circuito entre espiras, e garante desta forma que o potencial será máximo na saída (*output*).



Figura 4.21 – Da esquerda para a direita : case, primário, secundário.

4.2.2 Etapas experimentais

O trabalho começa com a definição dos objetivos. Pretende-se verificar qual o perfil de pré-aquecimento/cura que permite produzir peças com elevada qualidade e definir o tempo máximo de permanência em zona, em caso de paragem não programada, minimizando as perdas de qualidade. No capítulo X.Y serão descritos os resultados de todas as etapas presentes neste subcapítulo.

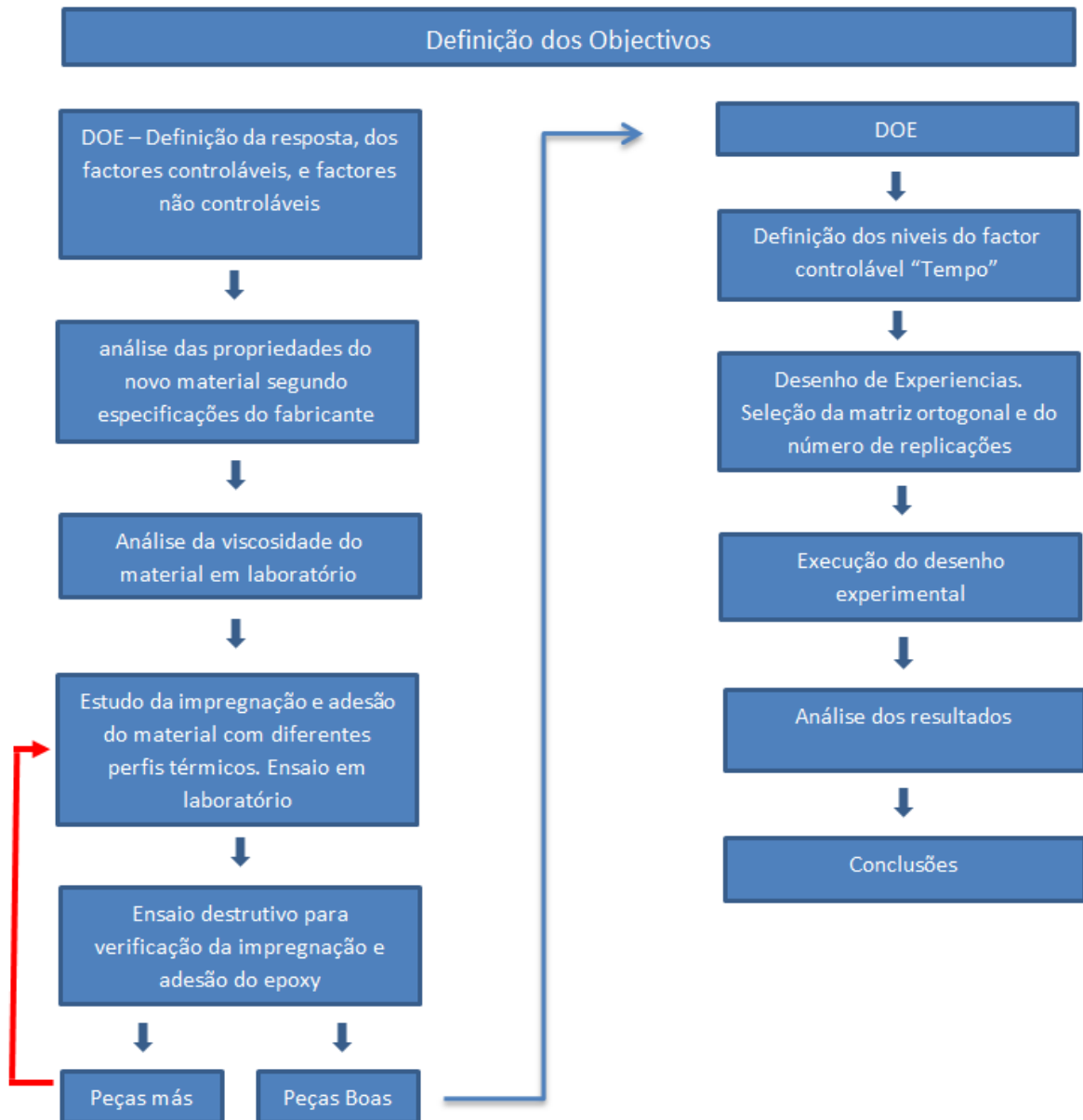


Figura 4.22 – Procedimento de execução do DOE. Etapas experimentais

Para realizar o *DOE* é necessário começar por definir a resposta e os fatores controláveis que têm influencia na resposta, que pode ser qualitativa e/ou quantitativa, e definir a hipótese de inclusão fatores não controláveis no estudo. Nesta fase é importante que todas as equipas envolvidas se reúnam e troquem ideias e opiniões até se chegar a um entendimento. A realização de um *brainstorming* é uma ferramenta muito útil neste fase.

Reuniu-se a equipa envolvida no trabalho e construiu-se um diagrama de Ishikawa, resultante de um *brainstorming* composto por 5 elementos da equipa de produção, engenharia, produto e equipa técnica que provou ser uma ferramenta eficaz na decisão de qual ou quais os fatores dos fornos a parametrizar e do melhor método para levar a cabo todo o estudo (fig. 4.23).

Ficou definido que o estudo se irá realizar em duas fases. Uma primeira onde será avaliado o perfil de temperatura de cura das ignições com um método experimental em que se varia um fator de cada vez e uma segunda fase onde irá ser aplicado o método de Taguchi para a definição do tempo de exposição das peças em cada zona do forno do pré-aquecimento e do gel. A análise qualitativa será feita às peças provenientes da experiência em laboratório através de um ensaio destrutivo. Esta análise permite verificar a adesão do *epoxy* aos componentes da ignição e a sua impregnação na bobine do primário e do secundário que, dependem diretamente do processo de cura do *epoxy*. Os resultados do *DOE* de Taguchi serão analisados quantitativamente no teste final, que fará a leitura da corrente no primário e no secundário, da resistência no primário e no secundário e do valor da diferença de potencial, ou “output”, da ignição. O valor da corrente e resistência não dependem do vazamento e cura do *epoxy* enquanto o valor do potencial (*output*), em *Kvolts*, pode ser afetado pelo tempo de exposição em cada zona do forno e pela temperatura de cura de cada zona.

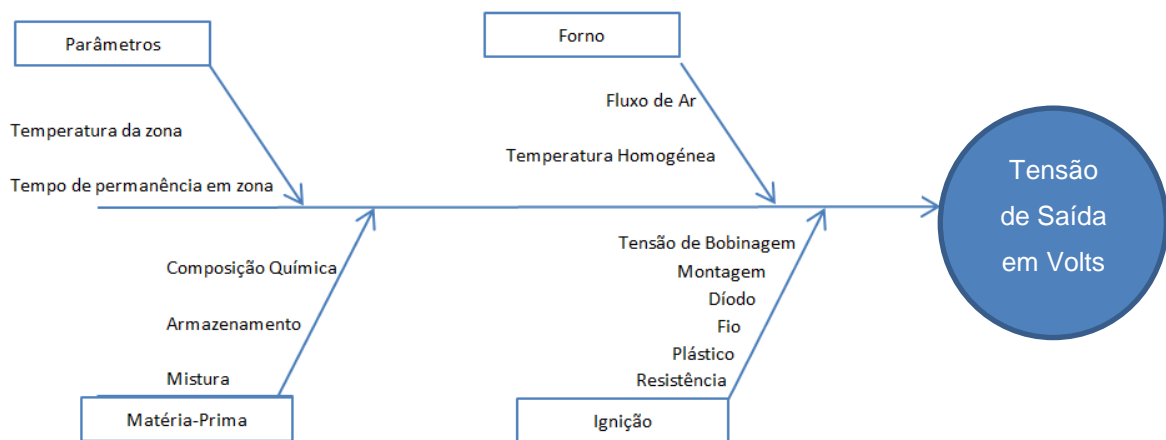


Figura 4.23 - diagrama de Ishikawa

De modo a sustentar as experiências em laboratório e o desenho de experiências de Taguchi, foram executadas cinco experiências com o objetivo de conhecer a evolução das curvas de viscosidade do material com um perfil de cura isotérmico. Esta etapa foi executada em laboratório com auxílio do viscosímetro *Brookfield* (capítulo 4.3.1.1) e os resultados encontram-se resumidos na figura seguinte.

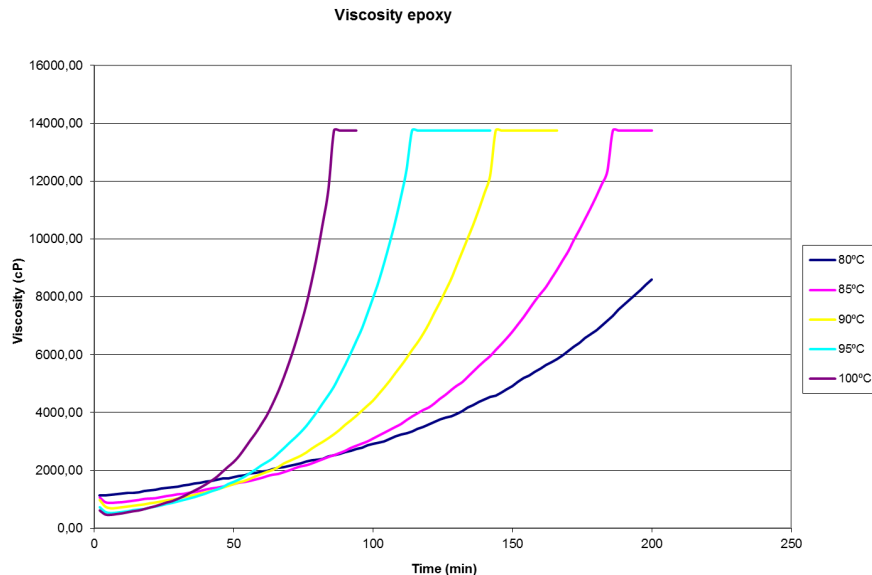


Figura 4.24 – Curvas de viscosidade (cP) em função do tempo (min) para o epoxy curado com diferentes perfis de temperatura isotérmicos.

No ensaio de viscosidade, é colocada uma amostra de material dentro de um frasco de vidro temperado, imerso num banho aquecido. Durante o ensaio, a força que o disco exerce no fluido para se deslocar sobre o seu eixo a uma velocidade constante é convertida em cP (centipoise), $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, e construído um gráfico em função do tempo. A duração do ensaio é definida com base na evolução da viscosidade do material e de modo a não correr o risco de danificar o equipamento de medição. Pela análise do gráfico verificou-se que nos perfis a 85°C, 90°C, 95°C e 100°C se atingiu um ponto onde a viscosidade passa a ser contante. Prolongando o tempo de ensaio em qualquer uma das experiências exceto para a temperatura a 80°C poderia resultar na quebra do veio ou do disco do viscosímetro devido ao aumento da tensão de corte provocada pela deslocação do disco no fluido à medida que o epoxy vai curando e passando o estado líquido para o estado sólido. No Anexo B, é possível encontrar as curvas de cada ensaio.

A etapa seguinte tem como objetivo testar em laboratório o perfil de cura que promove a impregnação e adesão do epoxy com base nos resultados obtidos no ensaio de viscosidade. Foram realizadas um total de nove experiências (ver tabela 4.4) desenhadas pelo engenheiro de processo e produto, seguindo um método intuitivo semelhante ao método de variação de um-fator-de-cada-vez. Para avaliar os resultados das experiências foram realizados ensaios destrutivos a 100% das peças curadas, de modo a inspecionar visualmente a impregnação e adesão do epoxy em função do perfil de temperatura (fig. 4.25). Para curar as peças foi utilizado o “Box Oven” da Linderberg (capítulo 4.2.1.2).

Tabela 4.4 – set-up das experiências realizadas em laboratório

| Experiência | Temperatura de cada zona |
|-------------|--|
| 1 | Z1 - 85°C ; Z2 - 100°C ; Z3 - 120°C ; Z4 - 150°C |
| 2 | Z1 - 90°C ; Z2 - 105°C ; Z3 - 120°C ; Z4 - 140°C |
| 3 | Z1 - 90°C ; Z2 - 90°C ; Z3 - 120°C ; Z4 - 150°C |
| 4 | Z1 - 85°C ; Z2 - 85°C ; Z3 - 115°C ; Z4 - 150°C |
| 5 | Z1 - 85°C ; Z2 - 85°C ; Z3 - 125°C ; Z4 - 150°C |
| 6 | Z1 - 95°C ; Z2 - 95°C ; Z3 - 115°C ; Z4 - 150°C |
| 7 | Z1 - 95°C ; Z2 - 95°C ; Z3 - 125°C ; Z4 - 150°C |
| 8 | Z1 - 85°C ; Z2 - 85°C ; Z3 - 120°C ; Z4 - 150°C |
| 9 | Z1 - 95°C ; Z2 - 95°C ; Z3 - 120°C ; Z4 - 150°C |

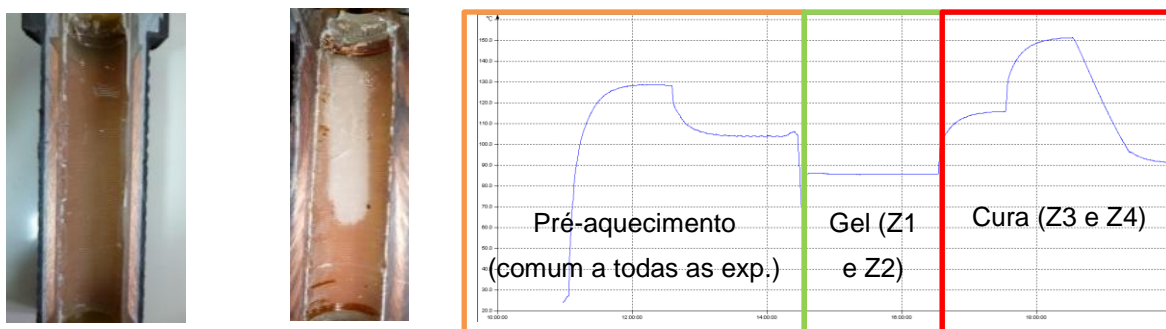


Figura 4.25 – Da esquerda para a direita: Peça com boa impregnação, Peça com má impregnação, perfil de temperatura da experiência 3.

Conhecidas as curvas de viscosidade/temperatura/tempo e o perfil que permite obter peças com melhor impregnação, entra-se na fase de desenvolvimento do desenho de experiências utilizando o método de Taguchi.

A definição dos níveis foi feita com base nas características do *epoxy* estudadas no viscosímetro e fornecidas pela *Lord*, nos resultados da experiência em laboratório, nos limites de permanência em zona definidos no equipamento *Huebers2040* e nas características dos componentes da ignição, em particular no tempo máximo de permanência do plástico da bobine do secundário na primeira zona do pré-aquecimento a 130°C, por se degradar impedindo uma boa adesão do *epoxy*, e inversamente, considerando o tempo mínimo de permanência na primeira zona do pré-aquecimento suficiente para volatilizar todas as impurezas que possam dificultar a adesão e impregnação do material. As especificações do equipamento *Huebers2040* são importantes para definir os níveis uma vez que derivam de um cenário de produção onde paragens não programadas devido a falhas de operação,

falhas de equipamento ou outros fatores alheios ao processo produtivo são frequentes e provocam atrasos na preparação, vazamento e cura do *epoxy* e por outro lado por ser o equipamento onde eram curadas as ignições em estudo, com outro material, antes da introdução do equipamento Huebers2665.

A qualidade e o rigor do processo está dependente da definição dos limites de especificação em zona, logo, é necessário conhecer se os limites definidos são capazes de produzir de acordo com as especificações do cliente e se a perda de qualidade para o consumidor final é desprezável. A definição dos níveis foi feita de forma a haver intervalos iguais entre eles, em cada um dos fornos, pré-aquecimento e gel, respetivamente.

FORNO DO PRÉ – AQUECIMENTO

Tempo máximo de permanência = 2h40 ± 1h30

FORNO O GEL

Tempo máximo de permanência em zona = 3h20 ± 1h00

Foram consideradas duas zonas para o forno do pré-aquecimento com duas temperaturas diferentes e apenas uma para o forno do gel (capítulo 4.2.1.3). Na realidade, cada um dos fornos apresenta duas zonas, mas no forno do gel, por ambas apresentarem a mesma temperatura (estabelecida com base na fase de experimentação em laboratório), foi possível reduzir o número de fatores de quatro para três, ficando definido um parâmetro *P1* na primeira zona do pré-aquecimento, *P2* na segunda zona do pré-aquecimento e *P3* para uma zona única no forno do gel.

Na figura 4.26 estão representados os fornos e a câmara de vazamento do equipamento Huebers2665 com os fatores controláveis, *P*, nos fornos de pré-aquecimento e gel, e os seus níveis 1, 2 e 3.

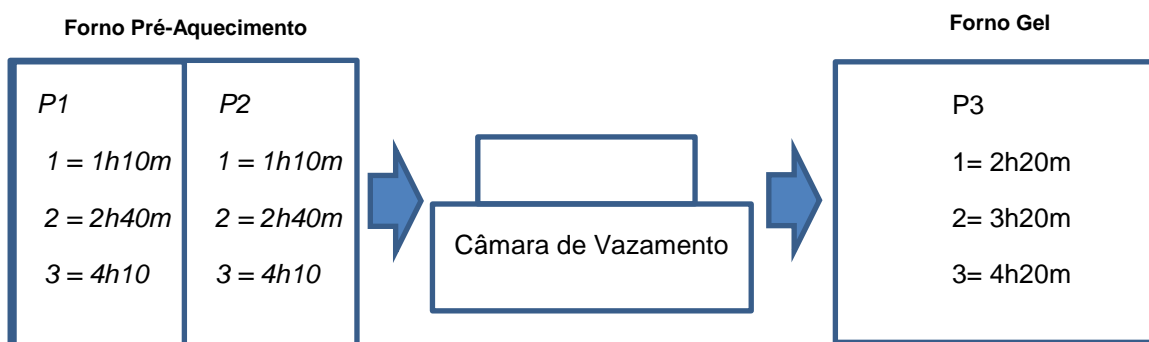


Figura 4.26 – fatores de controlo *P1*, *P2* e *P3* do DOE de Taguchi e seus níveis 1, 2 e 3.

Definiram-se 3 fatores a 3 níveis, o que justifica a utilização de uma matriz L_9 . A L_9 permite ainda, estudar uma interação entre esses fatores, no entanto, definiu-se a última coluna para o fator erro com o objetivo de compreender se as experiências foram bem conduzidas. Na tabela 4.5 está

representada a matriz de planeamento com níveis codificados e na tabela 4.6 a matriz de planeamento com os níveis reais.

Tabela 4.5 – matriz de planeamento de experiências com níveis codificados

| Experiência | P1 | P2 | P3 | Erro |
|-------------|----|----|----|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 |

Tabela 4.6 – matriz de planeamento de experiências com níveis reais

| Experiência | P1 | P2 | P3 | Erro |
|-------------|------|------|------|------|
| 1 | 1h10 | 1h10 | 2h20 | 1 |
| 2 | 1h10 | 2h40 | 3h20 | 2 |
| 3 | 1h10 | 4h10 | 4h20 | 3 |
| 4 | 2h40 | 1h10 | 3h20 | 3 |
| 5 | 2h40 | 2h40 | 4h20 | 1 |
| 6 | 2h40 | 4h10 | 2h20 | 2 |
| 7 | 4h10 | 1h10 | 4h20 | 2 |
| 8 | 4h10 | 2h40 | 2h20 | 3 |
| 9 | 4h10 | 4h10 | 3h20 | 1 |

A fase de preparação das experiências na linha de produção engloba três etapas: preparação, colocação das ignições nas paletes e programação dos *dataloggers* (4.2.1.4). Em cada experiência é vazada uma palleta contendo 16 ignições: 12 ignições que serão testadas e 4 ignições suplementares

no caso de se verificarem defeitos na montagem. Os restantes espaços da paleta, num total de 32, são preenchidos com copos para evitar derrame de material para a base da paleta (fig. 4.27).



Figura 4.27 –.palette preparada para entrar no forno do pré-aquecimento.

Para cada experiência são programados dois *dataloggers* (4.2.1.4). O *datalogger* regista a temperatura ao longo do tempo e permite verificar se a experiência correu como planeada (fig. 4.28). No Anexo B, encontram-se os perfis de temperatura característicos de cada uma das experiências.

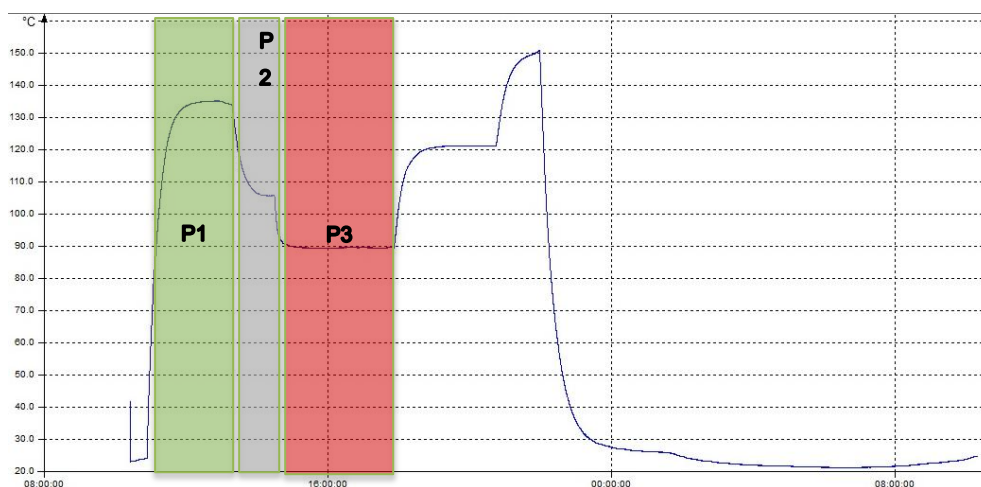


Figura 4.28 –.perfil registado pelo *datalogger* durante experiência 4.

Na tabela 4.7 estão representados os tempos de cada atividade de preparação das experiências.

Tabela 4.7 – Descrição das atividades de preparação das experiências e respetiva duração

| Atividade | Duração da atividade (em minutos) |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Preparação das peças | 15 |
| Colocação das peças na paleta | 5 |

| | |
|------------------------------------|----|
| Programação dos dataloggers | 8 |
| Colocação dos dataloggers no forno | 16 |

A preparação das experiências termina com a entrada dos *dataloggers* no forno do pré-aquecimento e quando falta apenas uma hora para as peças saírem do forno, inicia-se a fase de preparação da câmara de vazamento com a sequência de eventos e tempo de duração das etapas principais descritos na figura 4.29 e na tabela 4.8, respetivamente. Os reservatórios e a câmara de vazamento encontram-se representados na figura 4.30.

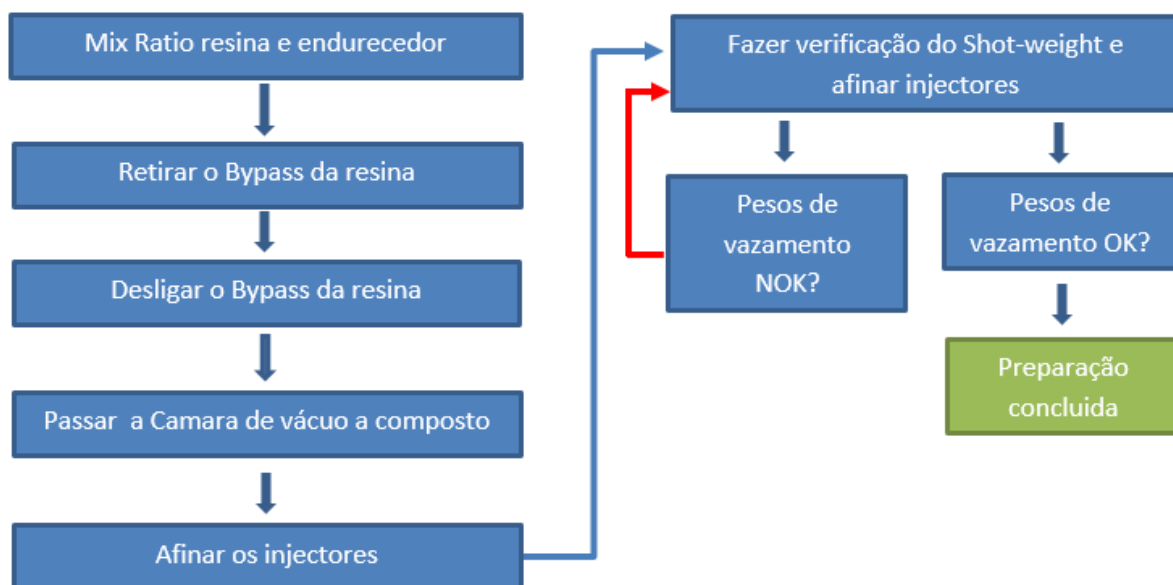


Figura 4.29 sequência de atividades na fase de preparação da câmara para o vazamento das ignições

Tabela 4.8 – duração das atividades de preparação da câmara para o vazamento das ignições

| Atividade | Duração da atividade (em minutos) |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Mix Ratio Resina e Endurecedor | 20 |
| Retirar Bypass da resina | 5 |
| Passagem a composto | 4 |
| Ajuste dos injetores | Mínimo 5 minutos |



Figura 4.30 (à esquerda) reservatórios de produção da resina e endurecedor, (à direita) camara de vazamento

A execução das experiências foi feita de forma aleatória e segundo a ordem descrita na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Ordem de execução do Desenho experimental e sua replicação

| 1ª Experiência | 1ª Replicação |
|---------------------------|---------------------------|
| Experiência 6 (4/3/2013) | Experiência 4 (19/3/2013) |
| Experiência 3 (5/3/2013) | Experiência 5 (20/3/2013) |
| Experiência 8 (6/3/2013) | Experiência 9 (21/3/2013) |
| Experiência 4 (7/3/2013) | Experiência 1 (22/3/2013) |
| Experiência 2 (8/3/2013) | Experiência 3 (25/3/2013) |
| Experiência 1 (11/3/2013) | Experiência 7 (26/3/2013) |
| Experiência 5 (12/3/2013) | Experiência 6 (27/3/2013) |
| Experiência 7 (13/3/2013) | Experiência 2 (2/4/2013) |
| Experiência 8 (14/3/2013) | Experiência 8 (3/4/2013) |

Após o vazamento as ignições são montadas numa cassete e testadas em lotes de quatro. É registado o valor do output de cada ignição (em kV) e gravado na base de dados do teste final. O *software* responsável pela leitura e registo dos dados é o *LabView8.2*, que corre em ambiente *Windows2000NT*. Os dados referentes ao teste final são apresentados no Anexo B. Na tabela 4.10, estão representados os valores médios do grupo de 12 ignições testadas para cada experiência e replicação do *DOE*.

Tabela 4.10 – Resultados da primeira experiência e sua replicação.

| Experiência | P1 | P2 | P3 | Erro | R1 (kV) | R2 (kV) |
|-------------|----|----|----|------|---------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 41,97 | 42,05 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 41,93 | 41,57 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 42,24 | 41,57 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 41,48 | 42,01 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 41,63 | 41,94 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 41,85 | 41,98 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 41,35 | 41,94 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 41,65 | 41,72 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 41,7325 | 40,585 |

5– Apresentação e discussão dos resultados

5.1 Controlo estatístico de Processo – *SPC*

Neste subcapítulo será feita uma análise aos dados recolhidos na fase de controlo estatístico do processo. As etapas serão descritas pela mesma ordem e seguindo o mesmo método do subcapítulo 4.1 de modo a facilitar a leitura dos resultados.

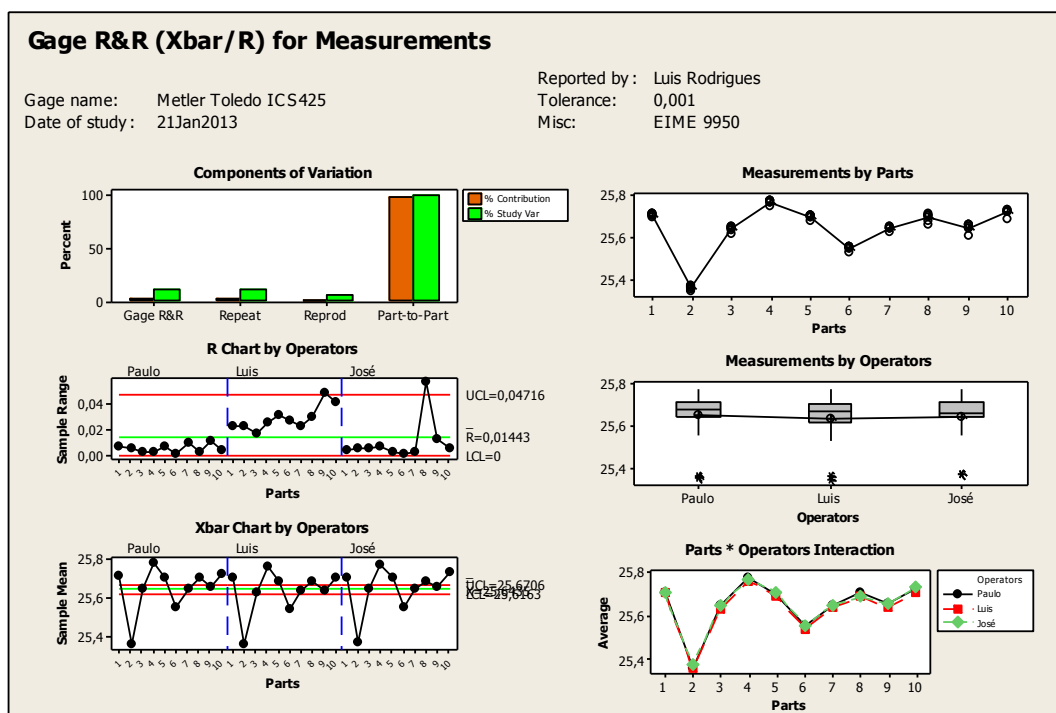
5.1.1 – Estudo R&R (Repetição e reprodutibilidade)

O Estudo *R&R* foi executado por três operadores e foram pesadas dez amostras de material, provenientes de uma pesagem teste na camara de vazamento do equipamento *Huebers2665*. Cada operador efetuou três pesagens, alternadamente, seguindo uma tabela construída automaticamente pelo *MinitabV16*. Os resultados são apresentados na tabela 5.1, tabela 5.2 e na figura 5.1.

Tabela 5.1 e 5.2 – Resultados do estudo R&R. percentagem de contribuição de cada fator para a variabilidade do estudo.

| | |
|----------------|----------------------|
| Gage name: | Metler Toledo ICS425 |
| Date of study: | 21Jan2013 |
| Reported by: | Luis Rodrigues |
| Tolerance: | 0,001 |
| Misc: | EIME 9950 |

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|---------|----------------------------|
| Total Gage R&R | 0,00 | 1,24 |
| Repeatability | 0,00 | 1 |
| Reproducibility | 0,00 | 0,24 |
| Part-To-Part | 0,02 | 98,76 |
| Total Variation | 0,02 | 100 |

Figura 5.1 – Estudo feito pelo *MinitabV16* para avaliação da capacidade do equipamento de medição.

No estudo efetuado pelo *MinitabV16*, o *software* detetou um número de categorias igual a 14. Como o número de categorias é superior a 5, significa que o aparelho de medição apresenta capacidade para distinguir uma peça, das outras. Pela análise da percentagem de contribuição do aparelho (tabela 5.2), igual a 1,24% < 10 %, pode-se igualmente concluir que o equipamento tem capacidade para executar as medições no estudo em questão.

5.1.2 Análise da Capacidade dos reservatórios

Os resultados da análise de capacidade, efectuada para os reservatórios de resina e de endurecedor, do equipamento *Huebers2665*, encontra-se resumida na tabela 5.3 Os dados colecionados durante o estudo, encontram-se no Anexo A .

Tabela 5.3 Resultados da análise de capacidade feita pelo MinitabV16 para os reservatórios de resina e endurecedor.

| Teste de Capacidade | | | | | X | | | MR | | |
|-----------------------------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|------|------|------|
| Reservatório de Resina | CP | CpK | LSE | LIE | LSC | LIC | LC | LSC | LIC | LC |
| 125 gramas | 4,53 | 3,61 | 125,5 | 124,5 | 125,21 | 124,99 | 125,10 | 0,14 | 0,00 | 0,04 |
| 250 gramas | 3,94 | 2,98 | 250,5 | 249,5 | 250,25 | 249,99 | 250,12 | 0,16 | 0,00 | 0,05 |
| Reservatório de Endurecedor | CP | CpK | LSE | LIE | LSC | LIC | LC | LSC | LIC | LC |
| 50 gramas | 8,34 | 7,27 | 50,5 | 49,5 | 50,00 | 49,88 | 49,94 | 0,07 | 0,00 | 0,02 |
| 100 gramas | 11,77 | 8 | 100,5 | 99,5 | 99,88 | 99,80 | 99,84 | 0,05 | 0,00 | 0,02 |

Os dois reservatórios apresentam um índice de capacidade muito alto. O reservatório do endurecedor apresenta um índice muito superior ao da resina. Uma das justificações para esta diferença de valores pode estar relacionada com sedimentações na válvula, diferenças entre o valor viscosidade do material à temperatura a que foi dispensado e à própria formulação do material. A resina apresenta-se muito mais viscosa que o endurecedor e flui com maior dificuldade pelos canais da válvula. Durante os ensaios, após o fecho da válvula a resina continuava a fluir lentamente para a taça, e após se retirar a taça para efetuar o vazamento, enquanto com o endurecedor, por ser muito fluido (pouco viscoso), tal não se verificava.

5.1.3 Análise da Capacidade dos Injetores

A capacidade dos injetores foi feita para cada injetor e para cada linha. Existem 6 injetores e cada injetor vaza em duas posições diferentes, ou seja, em 2 linhas diferentes. Por sua vez, o injetor tem um deslocamento ao longo das 4 colunas da paleta, o que perfaz um total de 8 peças vazadas por cada injetor. No capítulo 4.1.3, foi calculada a capacidade do injetor 1 na posição 1 (injetor 1:1), seguindo um método iterativo. Os dados recolhidos durante o estudo, encontram-se no Anexo A e os resultados foram compilados na tabela 5.4. A análise feita para os injetores é idêntica à que foi realizada para os reservatórios, no entanto, preferiu-se efetuar os cálculos através da aplicação das equações formuladas no capítulo 2.2.2 com o auxílio da folha de cálculo *MS-Excel*.

Tabela 5.4 Resultados da análise de capacidade feita para os injetores.

| Teste de capacidade | | | | | \bar{X} | | | R | |
|---------------------|------|------|------|------|-----------|--------|--------|-------|-------|
| Injector:posição | CP | CpK | LSE | LIE | LSC | LIC | LC | LSC | LC |
| 1:1 | 5,09 | 4,83 | 26,5 | 25,5 | 26,023 | 25,925 | 25,974 | 0,154 | 0,067 |
| 1:2 | 4,20 | 3,71 | | | 26,001 | 25,882 | 25,942 | 0,186 | 0,082 |
| 2:1 | 3,89 | 3,71 | | | 26,088 | 25,959 | 26,024 | 0,201 | 0,088 |
| 2:2 | 5,71 | 4,38 | | | 25,928 | 25,840 | 25,884 | 0,137 | 0,060 |
| 3:1 | 4,83 | 4,21 | | | 26,117 | 26,013 | 26,065 | 0,162 | 0,071 |
| 3:2 | 2,40 | 2,14 | | | 26,157 | 25,949 | 26,053 | 0,326 | 0,143 |
| 4:1 | 5,14 | 4,83 | | | 26,078 | 25,981 | 26,030 | 0,152 | 0,067 |
| 4:2 | 4,43 | 4,34 | | | 26,046 | 25,990 | 25,933 | 0,177 | 0,077 |
| 5:1 | 4,72 | 4,66 | | | 26,060 | 25,954 | 26,007 | 0,166 | 0,073 |
| 5:2 | 2,58 | 2,22 | | | 26,027 | 25,833 | 25,930 | 0,304 | 0,133 |
| 6:1 | 4,02 | 3,71 | | | 26,101 | 25,977 | 26,039 | 0,195 | 0,085 |
| 6:2 | 4,44 | 4,14 | | | 26,022 | 25,909 | 25,965 | 0,176 | 0,077 |

Analisando a tabela, verifica-se que todos os injetores apresentam um índice potencial de capacidade, $CpK > 2,00$, motivo pelo qual se consideram elegíveis para o processo em questão. Existem diferenças entre a capacidade de cada injetor e entre posições de vazamento que podem ser atribuídas às afinações finas de cada injetor, aos enchimentos do misturador estático em diferentes posições da paleta e a sedimentações. Por isto, consideraram-se desprezáveis as diferenças nos índices potenciais de capacidade entre injetores e posições de vazamento.

5.2 Desenho de experiências

Na preparação do desenho de experiências foi verificada a evolução da viscosidade do *epoxy* com diferentes perfis isotérmicos de modo a definir qual o melhor perfil de cura do *epoxy*. Foram realizados no total, cinco ensaios, com temperaturas compreendidas entre os 80°C e os 100°C. Na figura 5.2 encontra-se um gráfico resumo da evolução de viscosidade dos perfis testados. É possível verificar que à medida que se aumenta a temperatura do banho, o processo de cura do *epoxy* aumenta. Para o perfil isotérmico a 80°C, decorridos 200 minutos do início do ensaio e o *epoxy* ainda não atingiu o ponto de viscosidade máximo, o que significa que a esta temperatura uma passagem para uma segunda zona do forno com um perfil de temperatura mais elevado poderia resultar em *cracks* no *epoxy* e propriedades mecânicas e dielétricas deficientes. Para o perfil a 100°C o tempo decorrido até se atingir o ponto de viscosidade máximo é de apenas 70 minutos, o que pode resultar numa má impregnação do material nos componentes da ignição, em particular na bobine do secundário, por ser a que apresenta mais espiral e maior quantidade de fio de cobre. A definição correta da primeira zona do forno, correspondente ao primeiro perfil isotérmico de cura, também chamada de zona de geleificação, é extremamente importante para garantir uma boa impregnação, adesão e boas propriedades mecânicas do material. Através dos resultados dos ensaios destrutivos será possível verificar as consequências de uma mudança brusca no perfil de cura, de uma cura a uma temperatura da primeira zona demasiado alta e demasiado baixa.

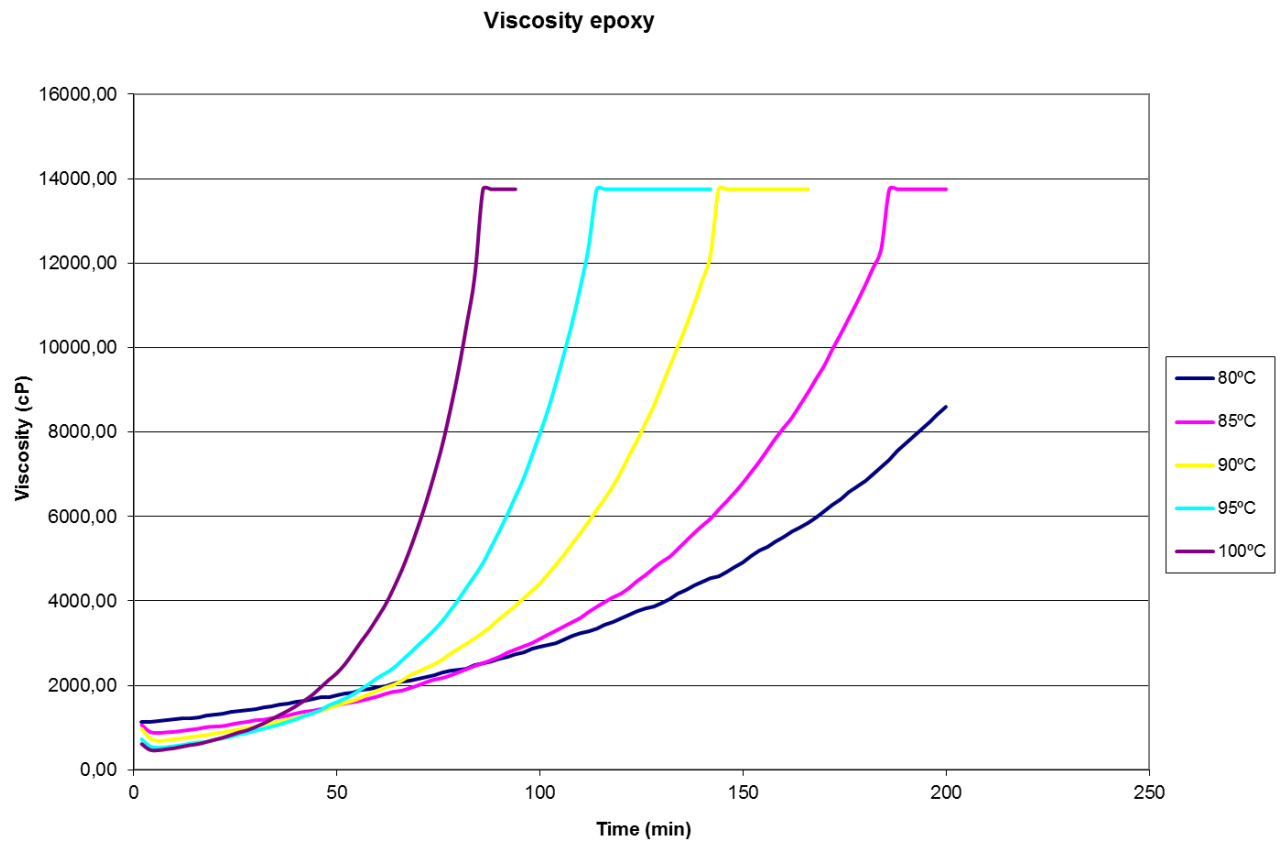


Figura 5.2 – Evolução da cura do epoxy a diferentes temperaturas da primeira zona

Com os resultados do ensaio de viscosidade foram executados os ensaios de cura com diferentes perfis de temperatura com tempos de permanência em zona iguais a 1h00min. O objetivo foi analisar qualitativamente a adesão do *epoxy* ao fio e ao *spool* do secundário. Em cada experiência foram testadas 4, 7 ou 8 ignições. Pode-se verificar pela análise dos resultados, que 3 das 4 experiências com um perfil de geleificação a iniciar-se nos 85°C apresentam falta de adesão severa e que todas elas produziram peças com má qualidade.

Tabela 5.5 – resultados da experiência com metodologia aproximada a um-fator-de-cada-vez

| Experiência | Temperatura de cada zona | Resultados |
|-------------|--|---|
| 1 | Z1 - 85°C ; Z2 - 100°C ; Z3 – 120°C ; Z4 – 150°C | 3 das 8 ignições apresentam pequenas marcas de falta de adesão |
| 2 | Z1 – 90°C ; Z2 – 105°C ; Z3 – 120°C ; Z4 – 140°C | 8 das 8 ignições apresentam falta de adesão, mas apenas de um dos lados |
| 3 | Z1 – 90°C ; Z2 – 90°C ; Z3 – 120°C ; Z4 – 150°C | 8 das 8 ignições apresenta boa adesão e impregnação. Peças Boas |
| 4 | Z1 – 85°C ; Z2 – 85°C ; Z3 – 115°C ; Z4 – 150°C | 8 das 8 ignições apresentam falta de adesão severa. |
| 5 | Z1 – 85°C ; Z2 – 85°C ; Z3 – 125°C ; Z4 – 150°C | 6 das 7 ignições apresentam falta de adesão severa e <i>cracks</i> |
| 6 | Z1 – 95°C ; Z2 – 95°C ; Z3 – 115°C ; Z4 – 150°C | 7 das 7 ignições apresentam pequenas marcas de falta de adesão |
| 7 | Z1 – 95°C ; Z2 – 95°C ; Z3 – 125°C ; Z4 – 150°C | 6 das 7 peças apresentam pequenas marcas de falta de adesão, mas apenas num dos lados da peça |
| 8 | Z1 – 85°C ; Z2 – 85°C ; Z3 – 120°C ; Z4 – 150°C | 4 das 4 peças apresentam falta de adesão severa |
| 9 | Z1 – 95°C ; Z2 – 95°C ; Z3 – 120°C ; Z4 – 150°C | 4 das 4 peças apresentam pequenas marcas de falta de adesão em apenas um dos lados da peça |

Na figura 5.3 é possível observar as peças vazadas na experiência 3 (que apresentou os melhores resultados), em comparação com as peças resultantes da experiência 4 (que apresentou resultados muito insatisfatórios).

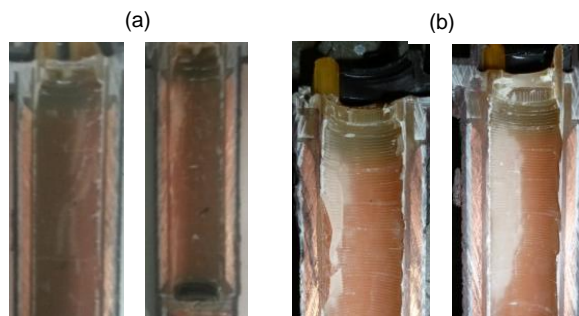


Figura 5.3 – (a) Resultados da experiência 3 com boa adesão do material, (b) resultado da experiência 4 com falta de adesão severa.

O objetivo da aplicação do método de Taguchi no processo de gel-cura do *epoxy* em ambiente industrial é minimizar a perda de qualidade do produto através da definição do melhor nível de cada fator controlável, estudando o valor nominal do *output*. No Anexo B, encontra-se o valor de *output*, medido em casa ignição.

Tabela 5.6 – Resposta medida na primeira experiência aplicando a metodologia de Taguchi e sua replicação

| Experiência | P1 | P2 | P3 | Erro | R1 (kV) | R2 (kV) |
|-------------|----|----|----|------|---------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 41,97 | 42,05 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 41,93 | 41,57 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 42,24 | 41,57 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 41,48 | 42,01 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 41,63 | 41,94 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 41,85 | 41,98 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 41,35 | 41,94 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 41,65 | 41,72 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 41,73 | 40,59 |

A Análise feita pelo MinitabV16 para a Matriz L_9 , com base na resposta medida na primeira experiência e na sua replicação, para medir o desempenho do processo através do índice Sinal-Ruído do tipo *N* (Nominal-é-melhor), mostra que a combinação dos níveis dos fatores que maximiza o índice e que por sua vez minimiza a Função de perda, corresponde à combinação dos níveis 1 ou 2 de P1 (serem graficamente muito semelhantes), com os níveis 2 e 1 de P2 e P3, respetivamente (fig. 5.4 e tabela 5.7). Pela análise do erro, é possível verificar que a variação não explicada é muito baixa (onde se encontra o erro), denotando a realização de um bom planeamento de experiências.

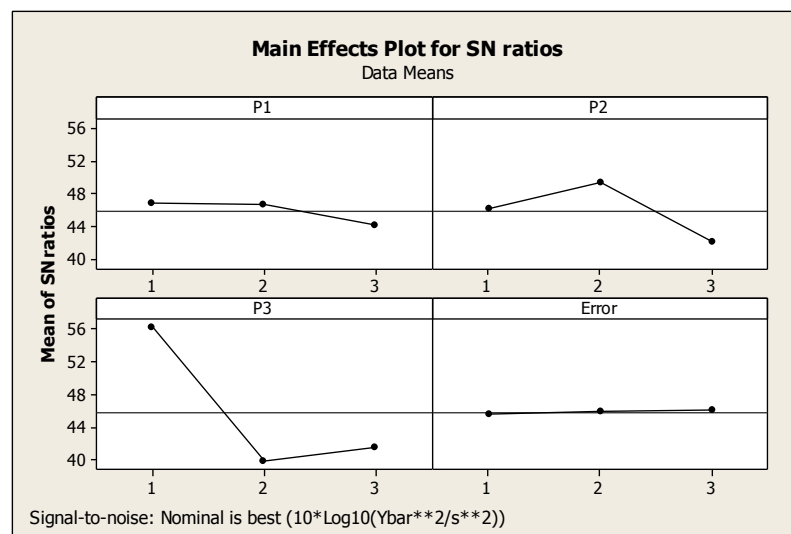


Figura 5.4 – Análise feita no *MinitabV16* para a análise do índice S/N médio do efeito das respostas.

Tabela 5.7 – Resumo das variáveis controláveis e erro

| Efeito | SN médio por factor e nível (dB) | | | | |
|--------|------------------------------------|--------|--------------------|---------------|-------------|
| | Média = 45,8494 σ = 8,49836 | | | | |
| | Nível | Média | Parâmetro estimado | Desvio padrão | Erro padrão |
| P1 | 1 | 46,883 | 1,033 | 9,357 | 1,342 |
| | 2 | 46,580 | 0,731 | 6,166 | 1,089 |
| | 3 | 44,085 | -1,764 | 12,500 | 1,551 |
| P2 | 1 | 46,115 | 0,266 | 9,645 | 1,362 |
| | 2 | 49,309 | 3,459 | 7,636 | 1,212 |
| | 3 | 42,125 | -3,725 | 9,933 | 1,383 |
| P3 | 1 | 56,193 | 10,343 | 2,597 | 0,707 |
| | 2 | 39,848 | -6,001 | 5,243 | 1,005 |
| | 3 | 41,507 | -4,342 | 3,445 | 0,814 |
| Erro | 1 | 45,595 | -0,255 | 11,567 | 1,492 |
| | 2 | 45,887 | 0,038 | 6,723 | 1,137 |
| | 3 | 46,067 | 0,217 | 10,475 | 1,420 |

A interpretação gráfica permite um entendimento mais rápido da melhor combinação de níveis, no entanto, uma análise completa requer maior detalhe. Assim sendo, serão analisadas as tabelas da Análise de Variância de cada fator (ANOVA), do valor do índice S/N do tipo N de cada experiência, a tabela de resumo das variáveis controláveis e erro e por último a tabela do melhor valor S/N esperado. A melhor combinação de níveis esperada, está representada na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – melhor combinação de níveis esperada

| Fator | Nível |
|-------|--------|
| P1 | 1 ou 2 |
| P2 | 2 |
| P3 | 1 |

Os resultados da ANOVA considerando S/N nominal para cada fator (tabela 5.9), verifica que o fator P1 é o menos significativo, logo, a utilização do nível 1 ou 2 irá apenas depender de outros fatores que não os de qualidade. Utilizando o nível 1 reduz-se o tempo de ciclo de fabrico e deverá ser a escolha acertada. O fator 3 é por sua vez o mais significativo por apresentar o valor de p , ou $Pvalue$ mais reduzido. O fator P3 corresponde á zona do gel, primeira zona da fase de cura do *epoxy*, crucial para que haja uma boa impregnação e adesão. É essencial que a peça permaneça nessa zona tempo suficiente para gelificar, no entanto, um tempo excessivo poderá comprometer as características mecânicas finais do *epoxy* como dureza, capacidade dielétrica, resiliência e temperatura de transição vítrea, T_g (abordado no capítulo 3.).

Tabela 5.9 – Anova considerando S/N nominal

| Efeito | Análise de Variância | | | | |
|----------|---|------|--------|---------|--------|
| | Média = 45,8494 σ = 8,49836 * - efeito agrupado no erro | | | | |
| | SS | g.l. | MS | F | p |
| {1} P1 | 14,14 | 2 | 7,07 | 41,54 | 0,0235 |
| {2} P2 | 77,74 | 2 | 38,87 | 228,35 | 0,0044 |
| {3} P3 | 485,56 | 2 | 242,78 | 1426,29 | 0,0007 |
| *erro | 0,34 | 2 | | | |
| Residual | 0,34 | 2 | 0,17 | | |

Os valores de S/N nominal para cada experiência (tabela 5.10), mostram que a experiência 8 apresenta o índice S/N mais elevado, com S/N = 58,11 (dB) e com uma conjugação de fatores e níveis P1=3;P2=2;P3=1. Na experiência 8, os dois fatores com maior significância (P2 e P3) encontram-se no “melhor nível”, o que explica o facto de ser considerada a melhor experiência segundo a análise feita. A tabela 5.11, apresenta o valor esperado de S/N para a melhor combinação de níveis, $S/N_{esperado} = 60,69$, muito próximo do S/N da experiência 8.

Tabela 5.10 – Valores de S/N nominal para cada experiência

| Exp. | Resumo | | | | |
|------|--------|----|----|------|-------|
| | P1 | P2 | P3 | erro | SN |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | (dB) |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 57,24 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 44,38 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 39,03 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 41,06 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 45,44 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 53,24 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 40,05 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 58,11 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 34,10 |

Tabela 5.11 – Melhor S/N nominal esperado

| Factor | S/N esperado em condições óptimas | | |
|--------------|---|--------------------|-------------|
| | Média = 45,8494 σ = 8,49836 * - efeito agrupado no erro | | |
| | Nível | Dimensão do efeito | Erro padrão |
| {1} P1 | 1 | 1,03 | 0,24 |
| {2} P2 | 2 | 3,46 | 0,24 |
| {3} P3 | 1 | 10,34 | 0,24 |
| *erro | 3 | 0,22 | |
| S/N esperado | 60,69 | | |

6. Conclusões e Trabalhos futuros

Atendendo aos poucos e difíceis resultados que se estavam a obter com o tipo de experimentação adoptada (intuitiva e não científica), houve todo o interesse em aplicar uma metodologia robusta e científica, como seja os métodos de Genichi Taguchi. Pretendeu-se evoluir de uma estratégia de experimentação intuitiva, com base nos conhecimentos sólidos sobre a matéria de vazamento e cura de ignições, dos engenheiros de produto e processo da Delphi, para um método experimental largamente utilizado na indústria, em todo o mundo, com provas concretas das vantagens da sua aplicação.

Os intervenientes na execução do desenho de experiências, seguindo a metodologia de Genichi Taguchi, fizeram também eles, parte do processo de avaliação do desempenho do equipamento de vazamento de ignições. Por considerar que o processo de cura e o processo de vazamento fazem parte de um todo, decidiu-se incluir o estudo da capacidade de vazamento, definindo, deste modo, dois objetivos:

- OBJECTIVO 1: Avaliação da capacidade do equipamento de vazamento de *epoxy*;
- OBJECTIVO 2: Maximização da qualidade do processo de cura de ignições vazadas com *epoxy*;

6.1 Avaliação da capacidade do equipamento de vazamento de *epoxy*

A introdução de um novo equipamento pressupõe uma análise de controlo estatístico do processo de modo a avaliar a capacidade do equipamento para produzir em conformidade com os padrões de qualidade da *Delphi Automotive Systems*.

Todos os participantes no estudo da capacidade da *Hübers2665*, estiveram igualmente presentes no desenvolvimento do desenho de experiências segundo a metodologia de Genichi Taguchi. Por esta razão e por não ser possível efetuar o *DOE* sem antes proceder ao correto *setup* do equipamento, que só se torna possível através do *SPC*, decidiu-se incluir o estudo de capacidade no presente trabalho.

Iniciou-se o trabalho com o estudo de desempenho do equipamento de medição, de forma a garantir que a variabilidade da Balança *Metler Toledo* seria insignificante face à variabilidade dos injetores. Uma análise crítica dos resultados obtidos pelo *software MinitabV16*, permitiu concluir que o equipamento é capaz e que o impacto no índice de capacidade dos injetores é desprezável.

O *epoxy* é composto por resina e endurecedor e é de extrema importância que a estequiometria das reações químicas seja garantida pelo equipamento de vazamento no misturador. Desta forma, avaliou-se a capacidade de vazamento dos reservatórios antes de se iniciar o estudo de capacidade dos injetores. Os resultados analisados no *MinitabV16*, provaram que o equipamento tem capacidade para produzir segundo a filosofia da qualidade 6sigma, adotada pela *Delphi*.

Da análise feita para a capacidade dos injetores, utilizando as equações de Shewart e seguindo um processo iterativo de modo a eliminar todos os pontos fora de controlo, conclui-se que todos os 6 injetores, em todas as 12 posições da paleta, são capazes de produzir segundo os padrões de qualidade exigidos. Concluiu-se que alguns injetores apresentam índices de capacidade mais reduzidos que outros, o que não era esperável uma vez que a distribuição do material pelos injetores deve ser uniforme. Atribui-se este desvio ao ajuste fino de cada injetor, que é afetado pelo erro humano e à possível presença de vestígios de sedimentação nos canais que levam o *epoxy* do misturador ao injetor, que é causa comum de variação neste tipo de equipamentos, principalmente quando não se encontram em processo de produção contínua, o que é o caso.

Em suma, este trabalho permitiu ao autor adquirir conhecimentos na área do Controlo da Qualidade de Processos, muito úteis na compreensão e na melhoria contínua dos processos aos quais está adjudicado. A introdução destes conceitos irá contribuir para a aplicação do método de Taguchi em outras linhas de produção idênticas e certamente com um abordagem mais científica e com menos erros de implementação. Seria interessante no futuro, e uma vez que o *DOE* é uma ferramenta de melhoria *off-line*, realizar um estudo que incluísse os fatores, (1) tempo em zona e (2) temperatura da zona, para todas as zonas do forno e num único desenho de experiências.

6.2 Maximização da qualidade do processo de cura de ignições

Aplicou-se o método de Taguchi para a característica de *output* das ignições com o objetivo de identificar qual a melhor combinação de fatores que permitem uma cura mais eficiente, reduzindo a variabilidade entre lotes de ignições. No método de Taguchi foi medido o índice S/N nominal para o *output*, que permitiu definir a combinação seguinte de fatores :

- Nível do Fator P1 desejável é igual a 1 ou 2;
- Nível do fator P2 desejável é igual a 2;
- Nível do fator P3 desejável é igual a 1;

Pela análise gráfica dos resultados e através do estudo da análise de variância considerando o índice S/N nominal para os três fatores, optou-se em P1, pelo nível 1 por ser aquele que permite reduzir o tempo de ciclo do processo, sem afetar significativamente a qualidade final das peças.

A aplicação do método revelou algumas dificuldades: o processo de cura de *epoxys* é longo e dispendioso; a matéria-prima apresenta custos muito elevados; o tempo de operação (preparação de toda a experiência), é igualmente elevado e é necessário haver sempre uma pessoa a vigiar o processo.

A aplicação do método foi muito vantajosa e provou a sua eficácia. Por comparação com os resultados obtidos através da aplicação do método mais intuitivo e da análise feita em laboratório para compreender a evolução da viscosidade do *epoxy*, verificou-se que o melhor perfil de

geleificação 140min a 90°C, se aproxima do perfil utilizado na melhor experiência de laboratório, 120min a uma temperatura uniforme de 90°C e do perfil de evolução do *epoxy* a 90°C (atinge o valor máximo de viscosidade 13750 cP ao fim de 144 minutos. Por isto, conclui-se que o método tem potencial para ser aplicado no futuro em novos processos.

6.3 Trabalhos Futuros

A introdução do método de Taguchi permitiu desenvolver novos conhecimentos na área da melhoria da qualidade de processos e o aprofundamento da matéria, que se revelou ser muito superficial, embora a análise do fator “erro”, por apresentar uma variação não explicada muito reduzida, conclui que o planeamento das experiências foi bom. A comparação do método com a metodologia utilizada na Delphi, provou que esta metodologia tem a possibilidade de trazer vantagens para a organização, pelo que no futuro, será utilizada na implementação de novos processos e melhoria contínua dos existentes.

Os conhecimentos em controlo estatístico de processo, serão úteis num futuro próximo na revisão dos limites de controlo dos dados analisados nos diversos equipamentos de vazamento de *epoxy* presentes nas instalações da *Delphi* Seixal, por se encontrarem desajustados com a realidade do dia-a-dia. Outra sugestão de um trabalho futuro, será a análise de controlo utilizando as ferramentas da norma 7870-1/2:2013, uma vez que não são utilizadas actualmente, nem tão pouco, foram utilizadas neste estudo.

Bibliografia

- [1] T. R. Chandrupatla, "Quality Concepts," em *Quality and Reliability in Engineering*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009, pp. 1-10.
- [2] Z. L. Pereira e J. G. Requeijo, Planeamento e controlo estatístico de processos, Qualidade, Lisboa: FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2008.
- [3] W. H. Woodall, "Controversies and Contradictions in Statistical Process Control," *Journal of Quality Technology*, vol. 32, pp. 341-350, 2000.
- [4] D. C. Montgomery, Introduction to STATISTICAL QUALITY CONTROL, 6ª ed., Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [5] P. W. W. H. W. M. A. Mohammed, "Plotting basic control charts : tutorial notes for healthcare practitioners," *Qual Saf Health Care*, vol. 17, pp. 137-145, 2008.
- [6] A. Lima, J. Lima, J. Silva, J. Alencar, J. Soares-Sobrinho, L. Lima e P. Rolim-Neto, Aplicação do Controle Estatístico de Processo na indústria farmacêutica, Brasil: Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada, 2007.
- [7] ANSI - American National Standards Institute, *ISO 7870-1/2:2013 Control charts: Shewhart control charts*, ANSI, 2013.
- [8] M. H. M. d. S. Cláudia Barbosa, *Manual Prático para a Gestão e Qualidade nas Organizações*, Chipre: Dashöfer Holding Lt. e Verlag Dashöfer, Edições Profissionais Sociedade Unipessoal, Lda., 2009.
- [9] G. S. Peace, Taguchi Methods : A Hands-On Approach To Quality Engineering, Addison-Wesley, 1995.
- [10] D. C. Montgomery, Design and Analysis of experiments 5th Edition, NY: John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [11] S. H. Park e J. Antony, Robust Design For Quality Engineering And Six Sigma, Seoul: World Scientific Publishing Co., 2008.
- [12] T. Y. Genichi Taguchi, Taguchi Methods - Design of Experiments, Vol. 4, Tokyo: American Supplier Institute, Inc., 1993.
- [13] A. B. G. Joseph M. Juran, Juran's Quality Handbook, 5th ed., USA: McGraw-Hill, 1999.
- [14] M. E. Aziz, "A STUDY ON THE EFFECT OF HARDENER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY RESIN," University of Technology Chemical Engineering Department, Baghdad, 2010.
- [15] K. S. Medinger, "Key Design Features For An Epoxy Potting Formulation," New York, 1995.
- [16] D. W. Hollstein, "Thermosetting resin systems for stator encapsulation in electro-mobility and

industrial motors,” Basel, 2012.

- [17] W.-J. W. F.-C. C. GING-HO HSIUE, “Synthesis, Characterization, Thermal and Flame-Retardant Properties of Silicon-Based Epoxy Resins,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 73, pp. 1231-1238, 1998.
- [18] M. S. Maksimiljan Mvravljak, “The Influence of Curing Temperature on Rheological Properties of Epoxy Adhesives,” University of Ljubljana, Ljubljana, 2011.
- [19] M. I. B. J. L. F. Teyssandier, “Modeling the Effect of the Curing Conversion on the Dynamic Viscosity of Epoxy Resins Cured by an Anhydride Curing Agent,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 115, pp. 1671-1674, 2009.
- [20] H. H. Winter, “Can the Gel Point of a Cross-linking Polymer Be Detected by the $G' - G''$ Crossover?,” *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, vol. 27 N°2, pp. 1699-1702, 1987.
- [21] Epotek, “Epoxy Technology - epoxies, adhesives for electronics, medical, semiconductor, fiber optics,” [Online]. Available: <http://www.epotek.com/sscdocs/techtips/Tech%20Tip%2023%20-%20Tg%20Glass%20Transition%20Temperature%20for%20Epoxies.pdf>. [Acedido em 26 Agosto 2013].
- [22] I. B. M. I. a. H. M. J. Macan, “DSC STUDY OF CURE KINETICS OF DGEBA-BASED EPOXY RESIN WITH POLY(OXYPROPYLENE) DIAMINE,” *J. Therm. Anal. Cal.*, n.º 81, pp. 370-373, 2005.
- [23] D. N. J. Salah, “Study of the Cure Reaction of Epoxy Resin Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) with Meta- Phenylene Diamine,” *Eng. & Tech. Journal*, vol. 31, pp. 1658-1673, 2013.
- [24] N. M. G. Witold Brostow, “Cure progress in epoxy systems: dependence on temperature and time,” *Mat Res Innovat*, vol. 7, pp. 125-132, 2003.
- [25] A. S. L. V. d. Matos, *Desenho DE EXPERIÊNCIAS APLICADO A SISTEMAS DE PRODUÇÃO*, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1997.
- [26] M. I. G. Fernanda Figueiredo, “Monitoring Industrial Processes with Robust Control Charts,” *REVSTAT - Statistical Journal*, vol. 7, pp. 151-170, 2009.
- [27] Minitab Software for Quality Improvement, “Understanding "Number of Distinct Categories" in Your Gage R&R Output,” [Online]. Available: <http://blog.minitab.com/blog/quality-data-analysis-and-statistics/understanding-your-gage-randr-output>. [Acedido em 15 Julho 2013].
- [28] Minitab Software for Quality Improvement, “How to interpret gage output - Part 2,” [Online]. Available: <http://blog.minitab.com/blog/quality-data-analysis-and-statistics/how-to-interpret-gage-output-part-2>. [Acedido em 15 Julho 2013].
- [29] M. Mvravljak e M. Sernek, “The Influence of Curing Temperature on Rheological Properties of Epoxy Adhesives,” University of Ljubljana, Ljubljana, 2011.

Anexo A

Material de Apoio ao SPC

Tabela A.1 - Ordem de execução do primeiro *run* de medições

| RunOrder | Operators | Parts | Measurements |
|----------|-----------|-------|--------------|
| 1 | Paulo | 2 | 25,365 |
| 2 | Paulo | 3 | 25,648 |
| 3 | Paulo | 8 | 25,703 |
| 4 | Paulo | 10 | 25,726 |
| 5 | Paulo | 6 | 25,554 |
| 6 | Paulo | 1 | 25,713 |
| 7 | Paulo | 7 | 25,643 |
| 8 | Paulo | 5 | 25,698 |
| 9 | Paulo | 9 | 25,648 |
| 10 | Paulo | 4 | 25,777 |
| 11 | Luis | 5 | 25,705 |
| 12 | Luis | 9 | 25,661 |
| 13 | Luis | 8 | 25,704 |
| 14 | Luis | 4 | 25,774 |
| 15 | Luis | 7 | 25,648 |
| 16 | Luis | 6 | 25,553 |
| 17 | Luis | 2 | 25,370 |
| 18 | Luis | 1 | 25,714 |
| 19 | Luis | 10 | 25,726 |
| 20 | Luis | 3 | 25,635 |
| 21 | José | 6 | 25,557 |
| 22 | José | 7 | 25,647 |
| 23 | José | 9 | 25,646 |
| 24 | José | 10 | 25,734 |
| 25 | José | 3 | 25,648 |
| 26 | José | 2 | 25,376 |
| 27 | José | 5 | 25,704 |
| 28 | José | 4 | 25,773 |
| 29 | José | 1 | 25,710 |
| 30 | José | 8 | 25,714 |

Tabela A.2 - Ordem de execução do segundo run de medições

| | | | |
|----|-------|----|--------|
| 31 | Paulo | 2 | 25,360 |
| 32 | Paulo | 10 | 25,722 |
| 33 | Paulo | 3 | 25,646 |
| 34 | Paulo | 1 | 25,707 |
| 35 | Paulo | 5 | 25,705 |
| 36 | Paulo | 6 | 25,555 |
| 37 | Paulo | 7 | 25,653 |
| 38 | Paulo | 8 | 25,706 |
| 39 | Paulo | 9 | 25,659 |
| 40 | Paulo | 4 | 25,775 |
| 41 | Luis | 8 | 25,675 |
| 42 | Luis | 2 | 25,348 |
| 43 | Luis | 5 | 25,674 |
| 44 | Luis | 3 | 25,619 |
| 45 | Luis | 9 | 25,613 |
| 46 | Luis | 7 | 25,626 |
| 47 | Luis | 6 | 25,527 |
| 48 | Luis | 4 | 25,749 |
| 49 | Luis | 1 | 25,692 |
| 50 | Luis | 10 | 25,685 |
| 51 | José | 9 | 25,658 |
| 52 | José | 1 | 25,706 |
| 53 | José | 8 | 25,658 |
| 54 | José | 2 | 25,371 |
| 55 | José | 3 | 25,643 |
| 56 | José | 6 | 25,556 |
| 57 | José | 10 | 25,729 |
| 58 | José | 4 | 25,766 |
| 59 | José | 5 | 25,707 |
| 60 | José | 7 | 25,645 |

Tabela A.3 – Fatores para construção das cartas de controlo de variáveis

| Dimensão Amostra n | Carta da Média | | | Carta do Desvios Padrão | | | | | | Carta da Amplitude | | | | |
|----------------------------|---------------------------|-------|-------|-------------------------|--------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Factores Limites Controlo | | | Factores Linha Central | | Factores para Limites de Controlo | | | | Factores para Limites de Controlo | | | | |
| | A | A_2 | A_3 | d_2 | c_4 | B_3 | B_4 | B_5 | B_6 | d_3 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 |
| 2 | 2,121 | 1,881 | 2,659 | 1,128 | 0,7979 | 0 | 3,267 | 0 | 2,606 | 0,853 | 0 | 3,686 | 0 | 3,267 |
| 3 | 1,732 | 1,023 | 1,954 | 1,693 | 0,8862 | 0 | 2,568 | 0 | 2,276 | 0,888 | 0 | 4,358 | 0 | 2,574 |
| 4 | 1,500 | 0,729 | 1,628 | 2,059 | 0,9213 | 0 | 2,266 | 0 | 2,088 | 0,880 | 0 | 4,698 | 0 | 2,282 |
| 5 | 1,342 | 0,577 | 1,427 | 2,326 | 0,9400 | 0 | 2,089 | 0 | 1,964 | 0,864 | 0 | 4,918 | 0 | 2,114 |
| 6 | 1,225 | 0,483 | 1,287 | 2,534 | 0,9515 | 0,030 | 1,970 | 0,029 | 1,874 | 0,848 | 0 | 5,078 | 0 | 2,004 |
| 7 | 1,134 | 0,419 | 1,182 | 2,704 | 0,9594 | 0,118 | 1,882 | 0,113 | 1,806 | 0,833 | 0,204 | 5,204 | 0,076 | 1,924 |
| 8 | 1,061 | 0,373 | 1,099 | 2,847 | 0,9650 | 0,185 | 1,815 | 0,179 | 1,751 | 0,820 | 0,388 | 5,306 | 0,136 | 1,864 |
| 9 | 1,000 | 0,337 | 1,032 | 2,970 | 0,9693 | 0,239 | 1,761 | 0,232 | 1,707 | 0,808 | 0,547 | 5,393 | 0,184 | 1,816 |
| 10 | 0,949 | 0,308 | 0,975 | 3,078 | 0,9727 | 0,284 | 1,716 | 0,276 | 1,669 | 0,797 | 0,687 | 5,469 | 0,223 | 1,777 |
| 11 | 0,905 | 0,285 | 0,927 | 3,173 | 0,9754 | 0,321 | 1,679 | 0,313 | 1,637 | 0,787 | 0,811 | 5,535 | 0,256 | 1,744 |
| 12 | 0,866 | 0,266 | 0,886 | 3,258 | 0,9776 | 0,354 | 1,646 | 0,346 | 1,610 | 0,778 | 0,922 | 5,594 | 0,283 | 1,717 |
| 13 | 0,832 | 0,249 | 0,850 | 3,336 | 0,9794 | 0,382 | 1,618 | 0,374 | 1,585 | 0,770 | 1,025 | 5,647 | 0,307 | 1,693 |
| 14 | 0,802 | 0,235 | 0,817 | 3,407 | 0,9810 | 0,406 | 1,594 | 0,399 | 1,563 | 0,763 | 1,118 | 5,696 | 0,328 | 1,672 |
| 15 | 0,775 | 0,223 | 0,789 | 3,472 | 0,9823 | 0,428 | 1,572 | 0,421 | 1,544 | 0,756 | 1,203 | 5,741 | 0,347 | 1,653 |
| 16 | 0,750 | 0,212 | 0,763 | 3,532 | 0,9835 | 0,448 | 1,552 | 0,440 | 1,526 | 0,750 | 1,282 | 5,782 | 0,363 | 1,637 |
| 17 | 0,728 | 0,203 | 0,739 | 3,588 | 0,9845 | 0,466 | 1,534 | 0,458 | 1,511 | 0,744 | 1,356 | 5,820 | 0,378 | 1,622 |
| 18 | 0,707 | 0,194 | 0,718 | 3,640 | 0,9854 | 0,482 | 1,518 | 0,475 | 1,496 | 0,739 | 1,424 | 5,856 | 0,391 | 1,608 |
| 19 | 0,688 | 0,187 | 0,698 | 3,689 | 0,9862 | 0,497 | 1,503 | 0,490 | 1,483 | 0,734 | 1,487 | 5,891 | 0,403 | 1,597 |
| 20 | 0,671 | 0,180 | 0,680 | 3,735 | 0,9869 | 0,510 | 1,490 | 0,504 | 1,470 | 0,729 | 1,549 | 5,921 | 0,415 | 1,585 |
| 21 | 0,655 | 0,173 | 0,663 | 3,778 | 0,9876 | 0,523 | 1,477 | 0,516 | 1,459 | 0,724 | 1,605 | 5,951 | 0,425 | 1,575 |
| 22 | 0,640 | 0,167 | 0,647 | 3,819 | 0,9882 | 0,534 | 1,466 | 0,528 | 1,448 | 0,720 | 1,659 | 5,979 | 0,434 | 1,566 |
| 23 | 0,626 | 0,162 | 0,633 | 3,858 | 0,9887 | 0,545 | 1,455 | 0,539 | 1,438 | 0,716 | 1,710 | 6,006 | 0,443 | 1,557 |
| 24 | 0,612 | 0,157 | 0,619 | 3,895 | 0,9892 | 0,555 | 1,445 | 0,549 | 1,429 | 0,712 | 1,759 | 6,031 | 0,451 | 1,548 |
| 25 | 0,600 | 0,153 | 0,606 | 3,931 | 0,9896 | 0,565 | 1,435 | 0,559 | 1,420 | 0,708 | 1,806 | 6,056 | 0,459 | 1,541 |

Para $n > 25$

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \quad A_3 = -\frac{3}{c_4 \sqrt{n}} \quad c_4 = \frac{4(n-1)}{4n-3} \quad B_3 = 1 - \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \quad B_4 = 1 + \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \quad B_5 = c_4 - 3\sqrt{1-c_4^2} \quad B_6 = c_4 + 3\sqrt{1-c_4^2}$$

[Fonte: [2]]



Figura A.1 – Carta X e Carta R. Injetor 1 Fila 1

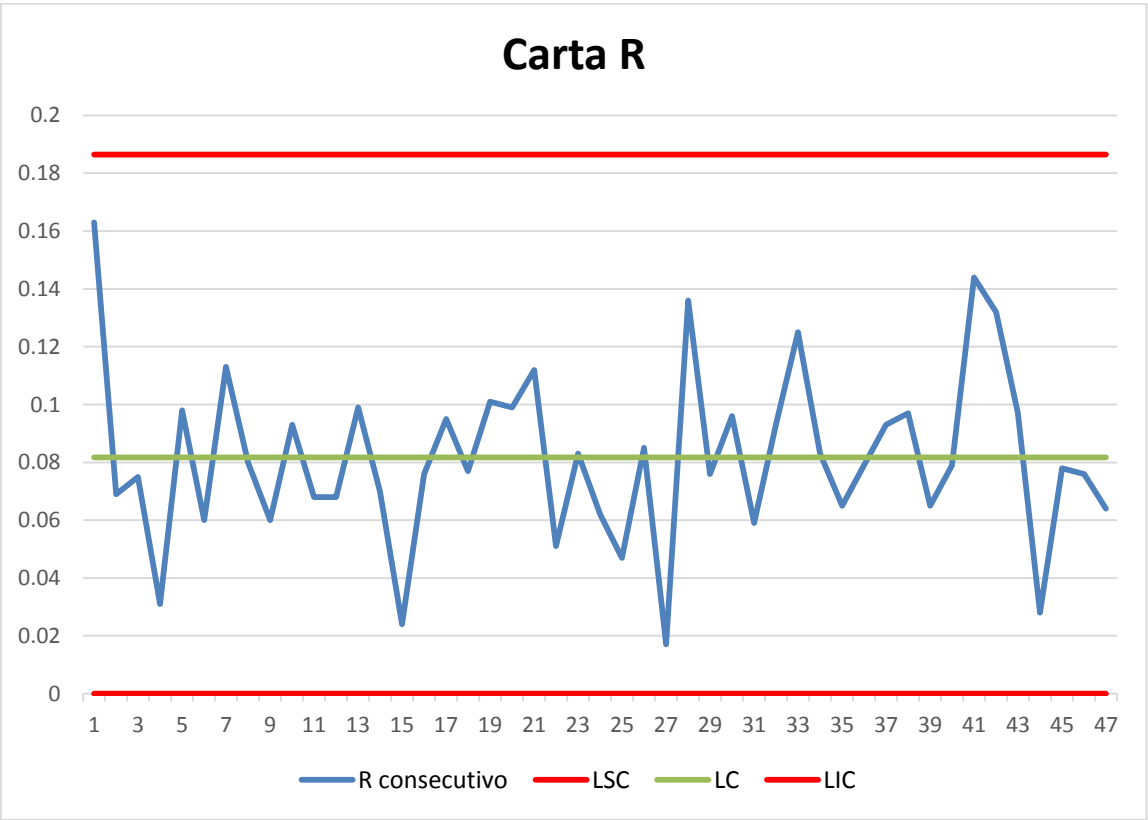
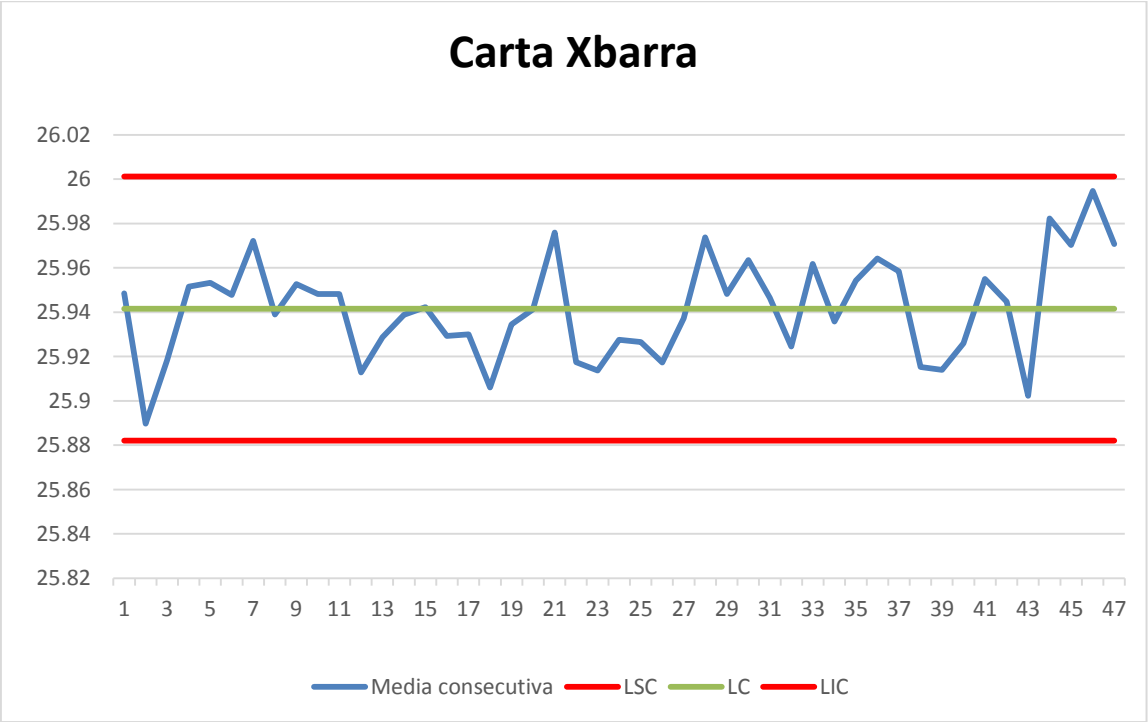


Figura A.2 - Carta X e Carta R. Injetor 1, Fila 2

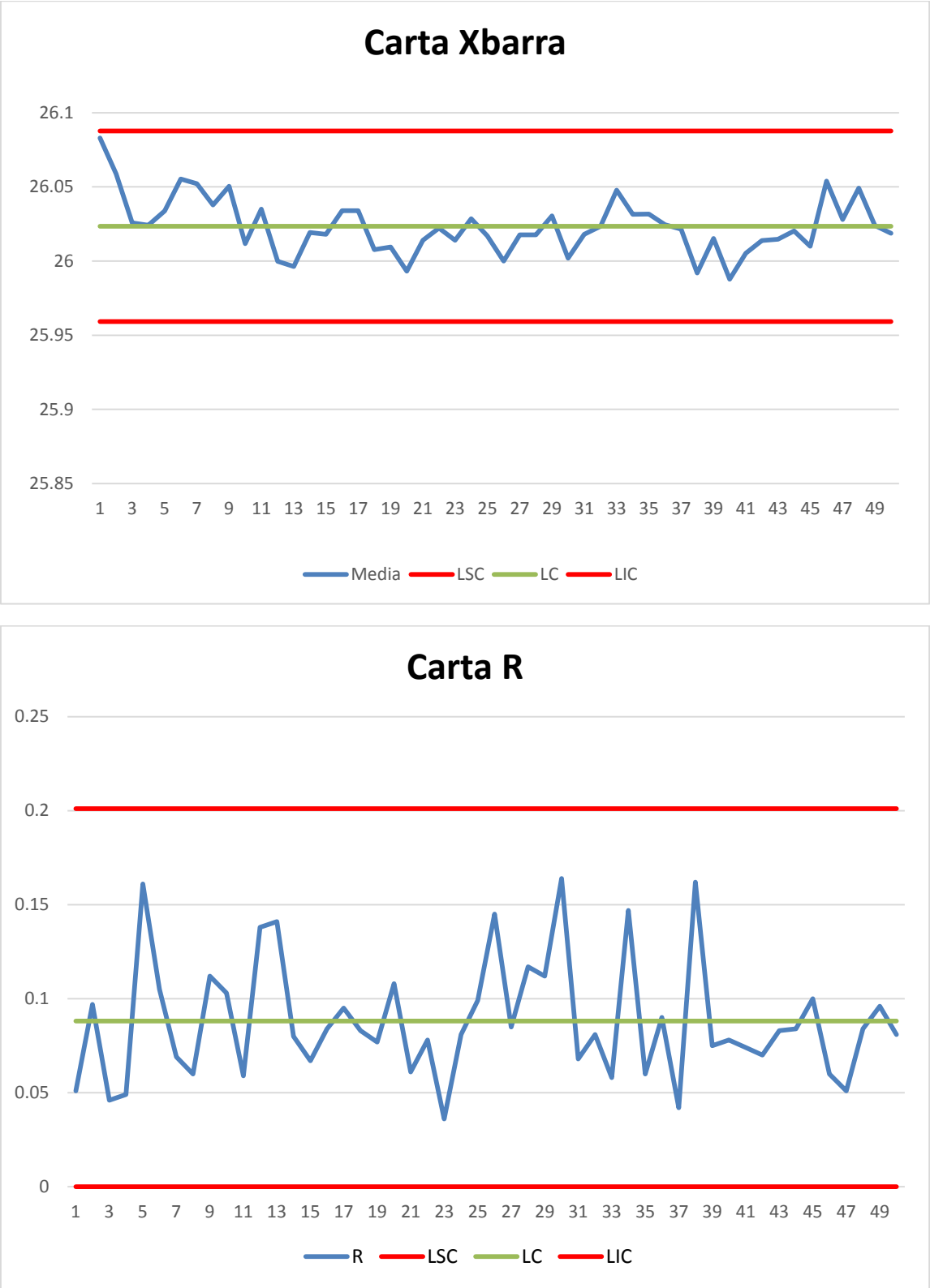


Figura A.3- Carta X e Carta R. Injetor 2, Fila 3

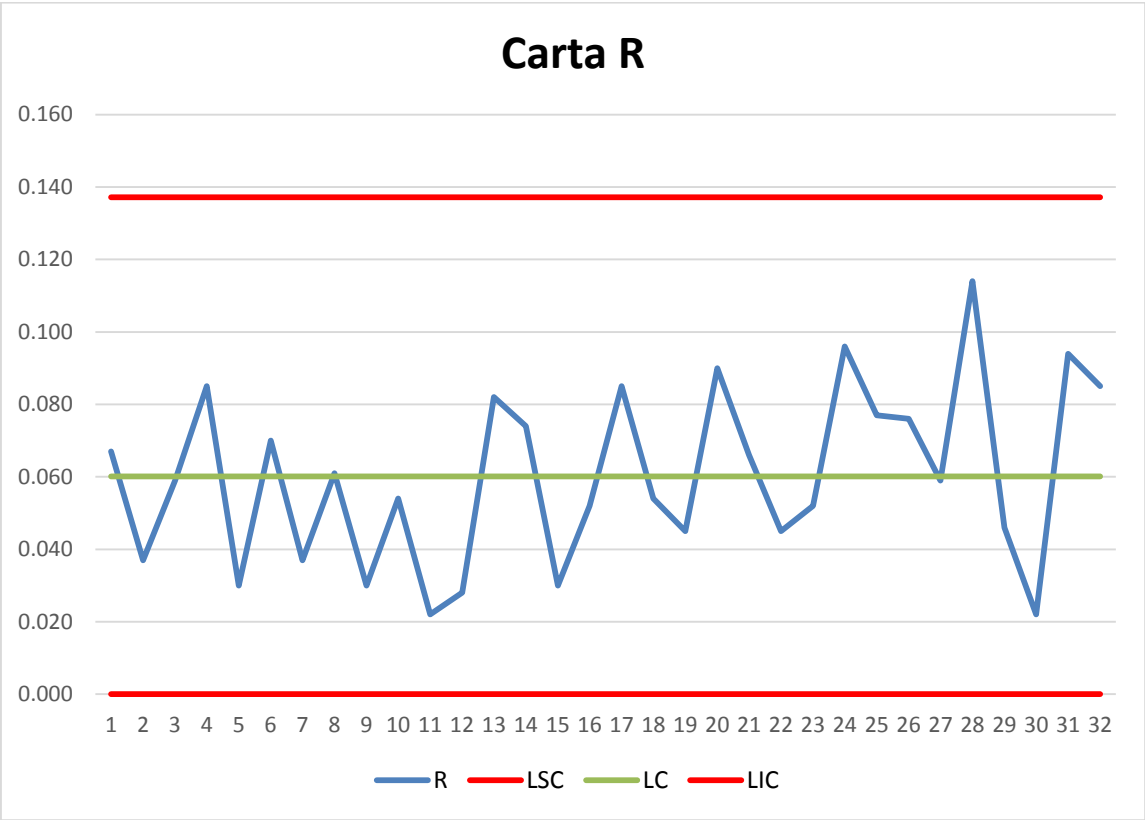
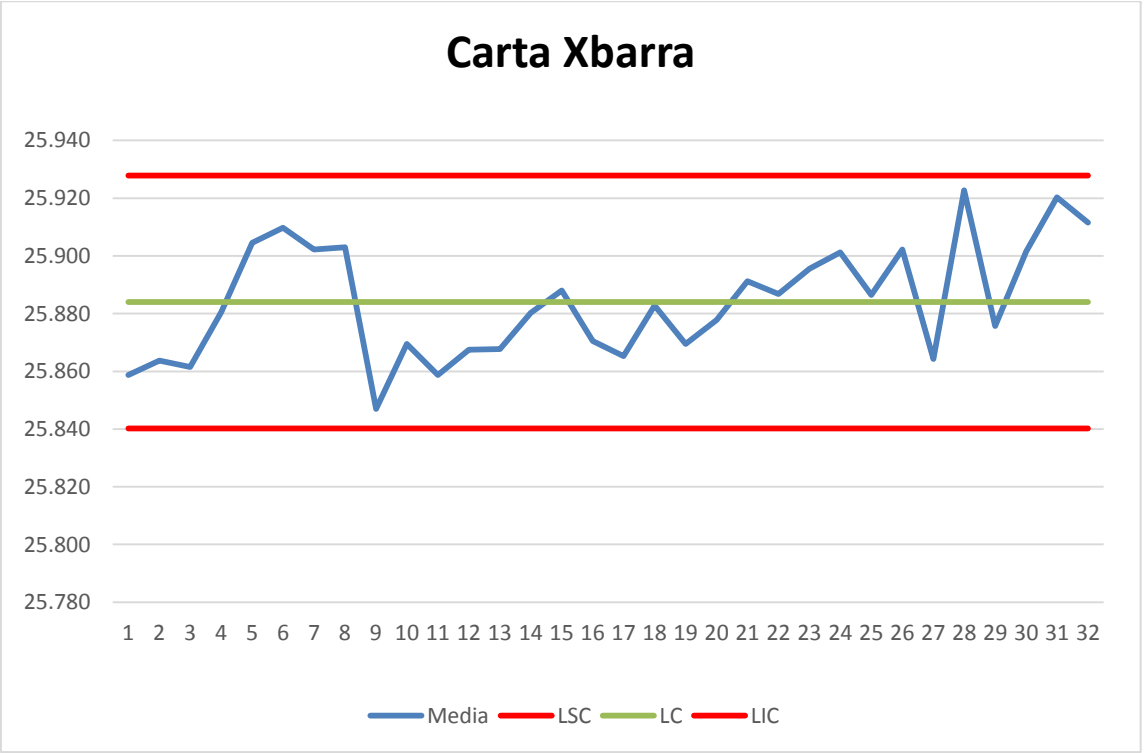


Figura A.4- Carta X e Carta R. Injector 2, Fila 4

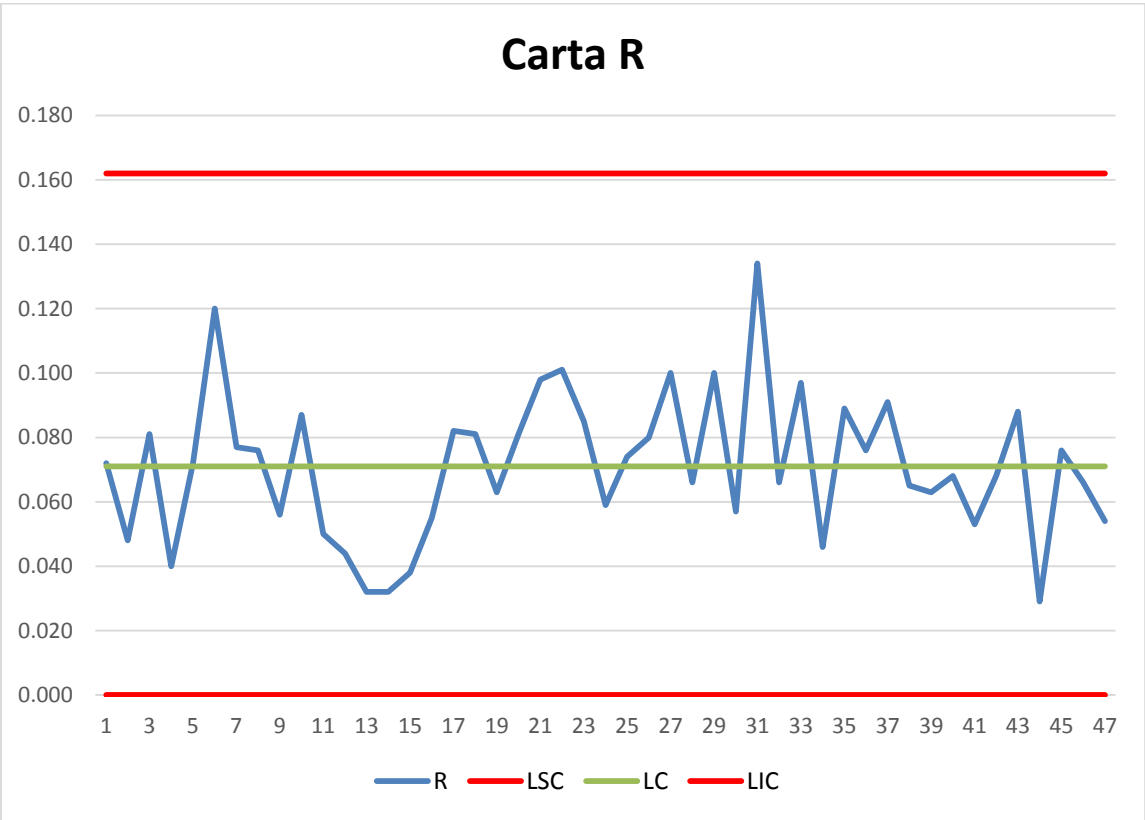
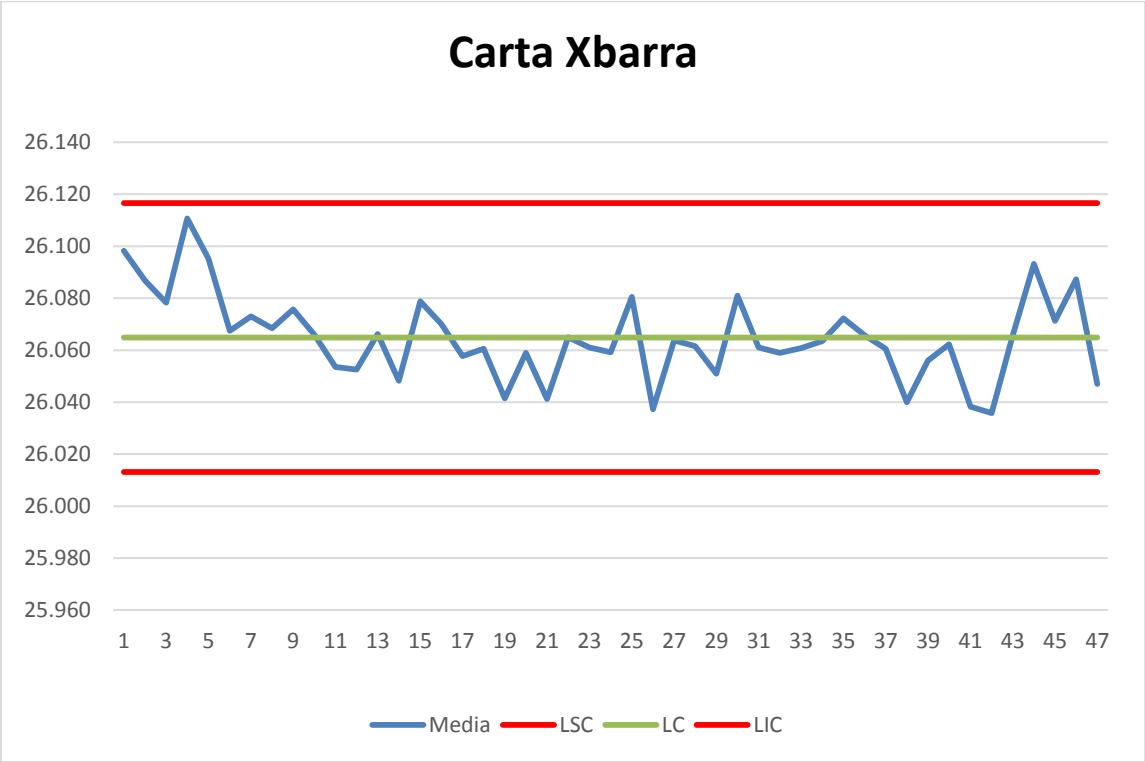


Figura A.5 - Carta X e Carta R. Injector 3, Fila 5

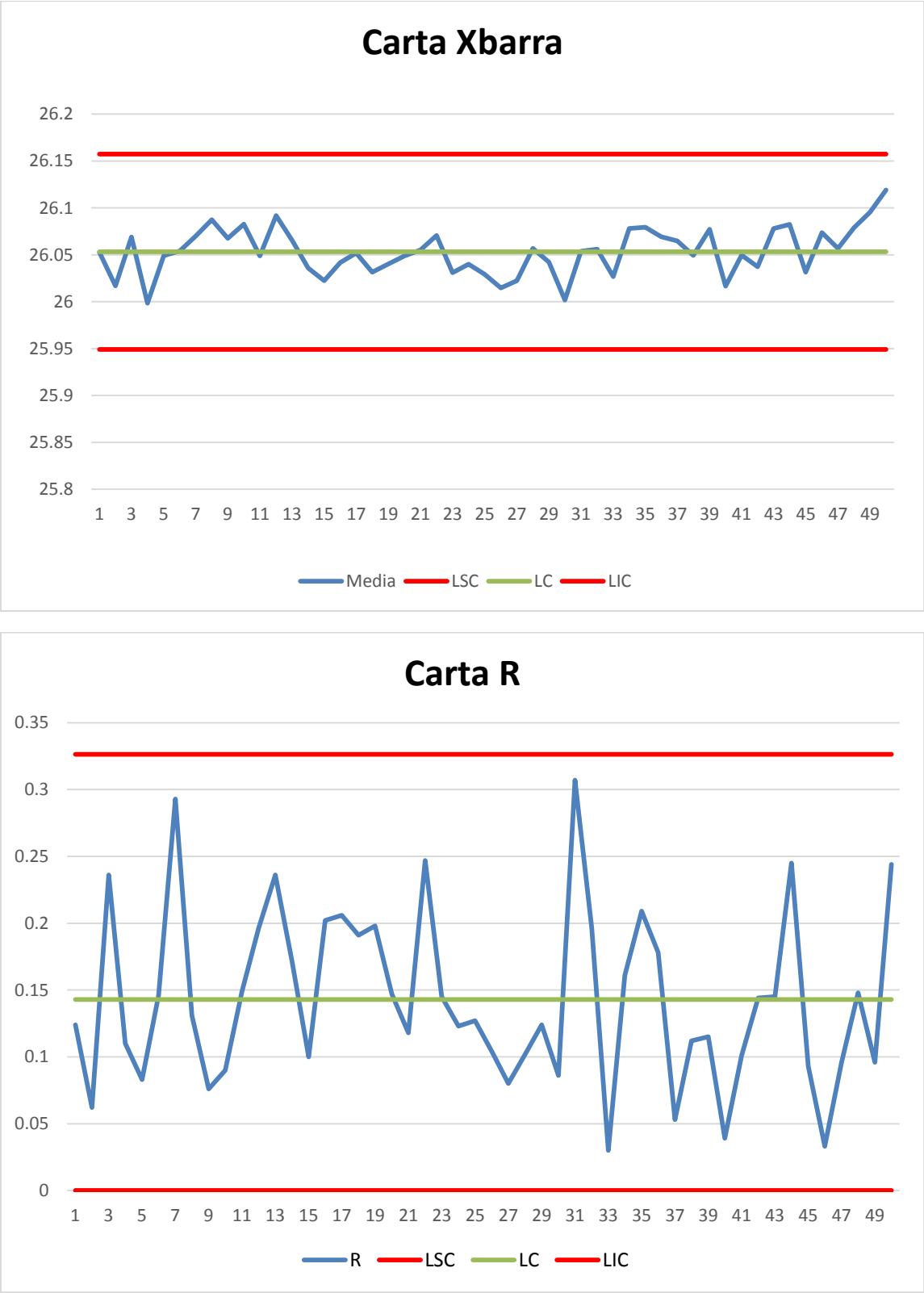


Figura A.6 - Carta X e Carta R. Injetor 3, Fila 6

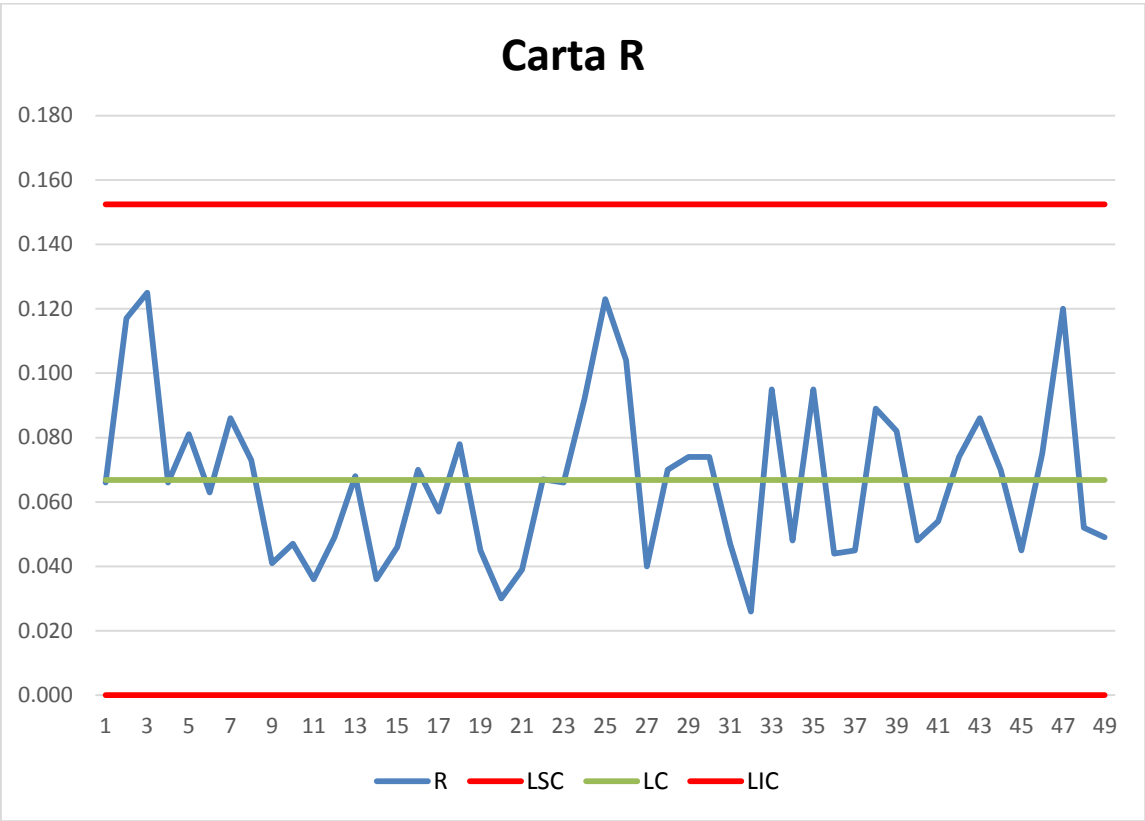
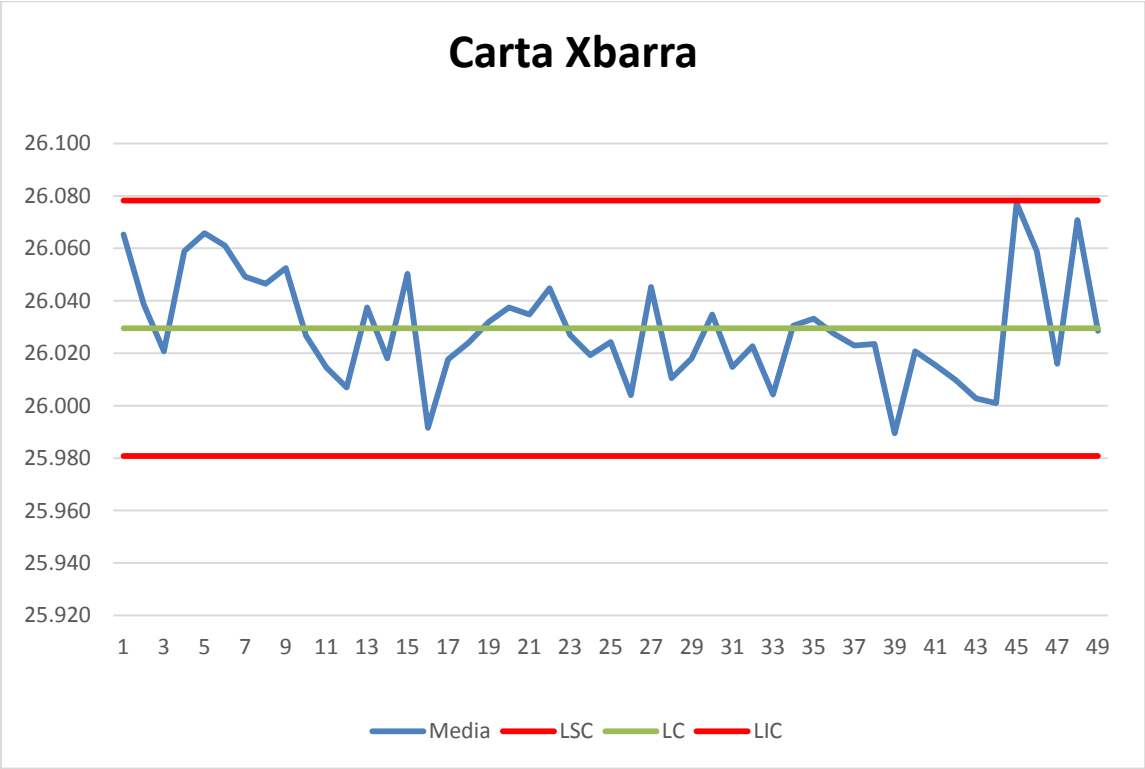


Figura A.7 - Carta X e Carta R. Injetor 4, Fila 7

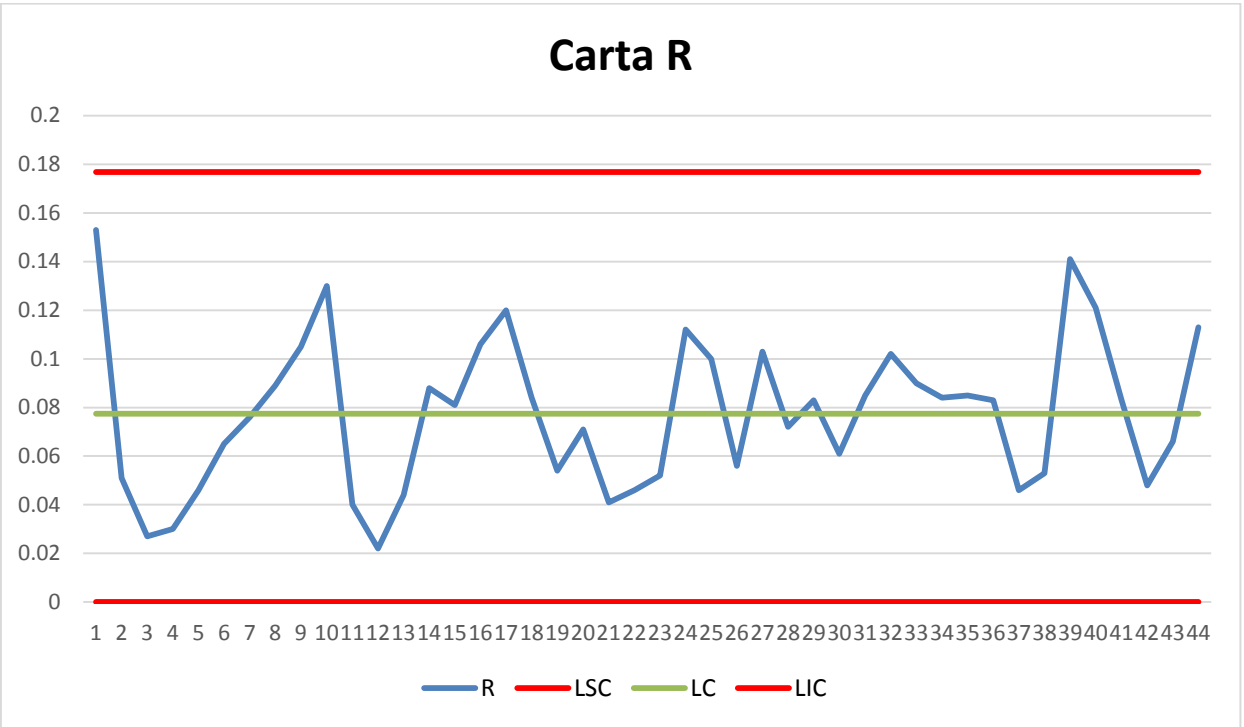
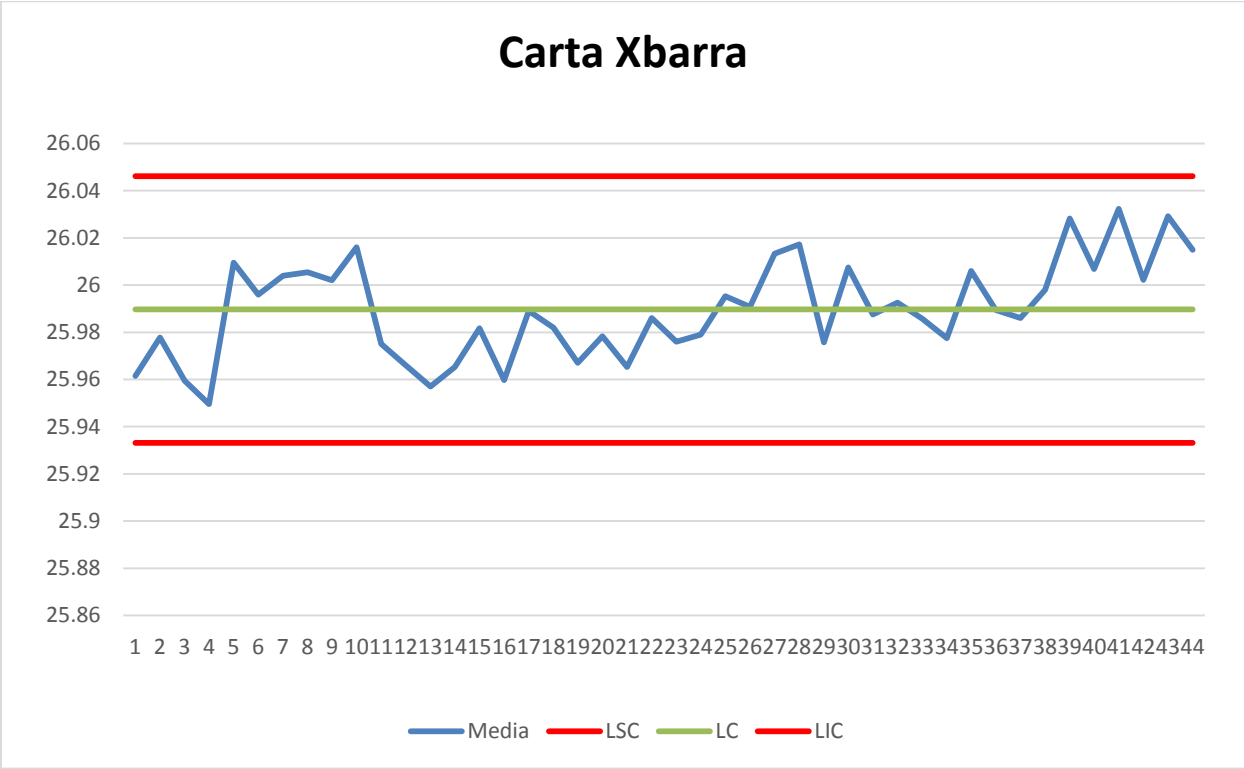


Figura A.8 - Carta X e Carta R. Injector 4, Fila 8

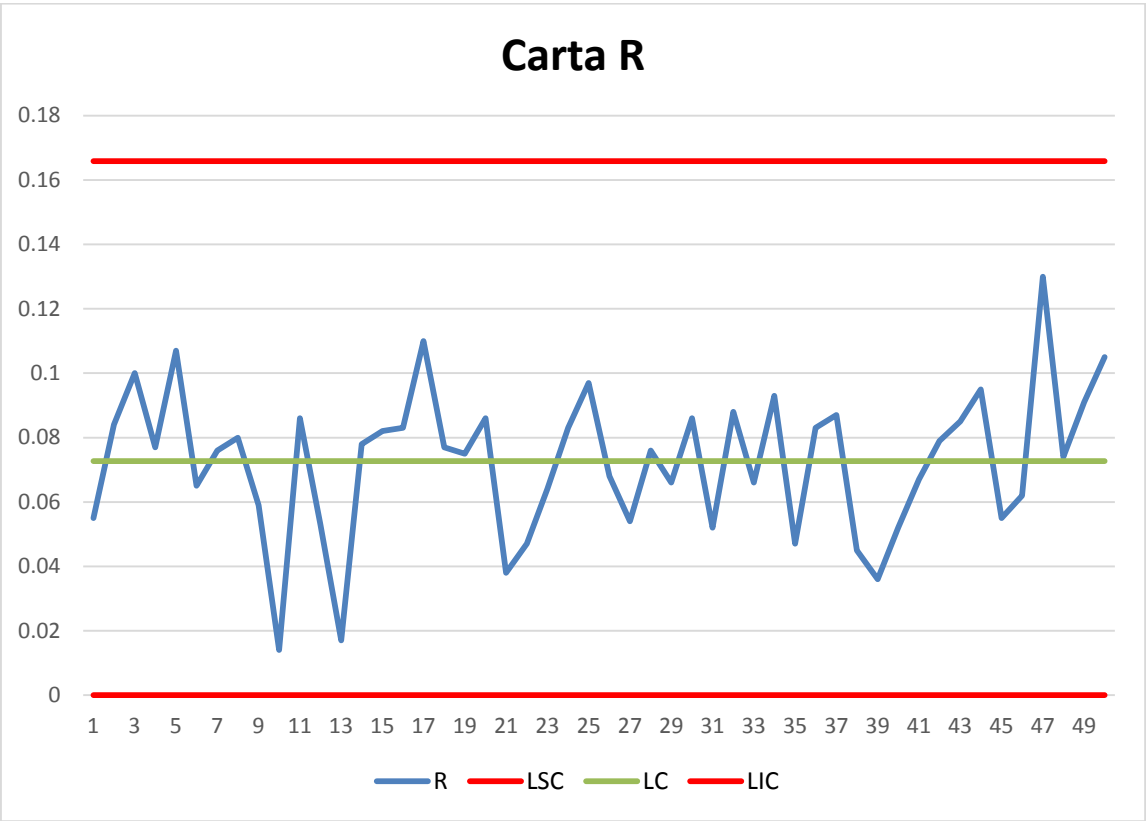
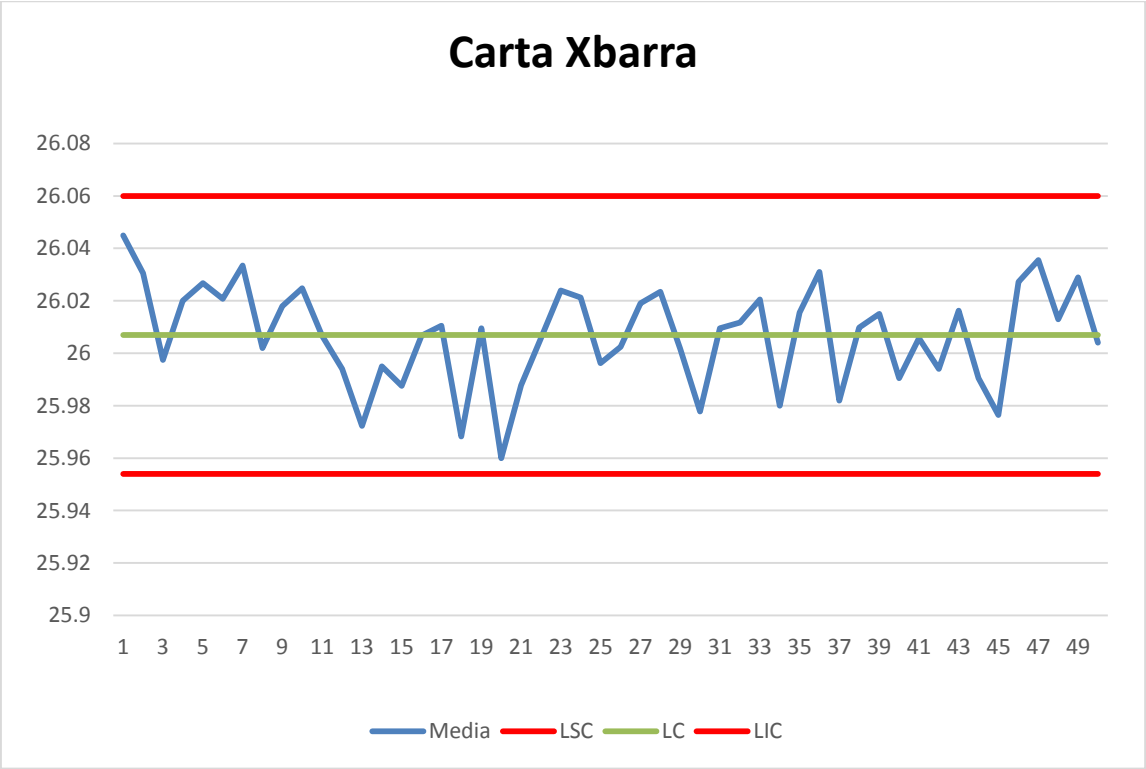


Figura A.9 - Carta *X* e Carta R. Injetor 5, Fila 9

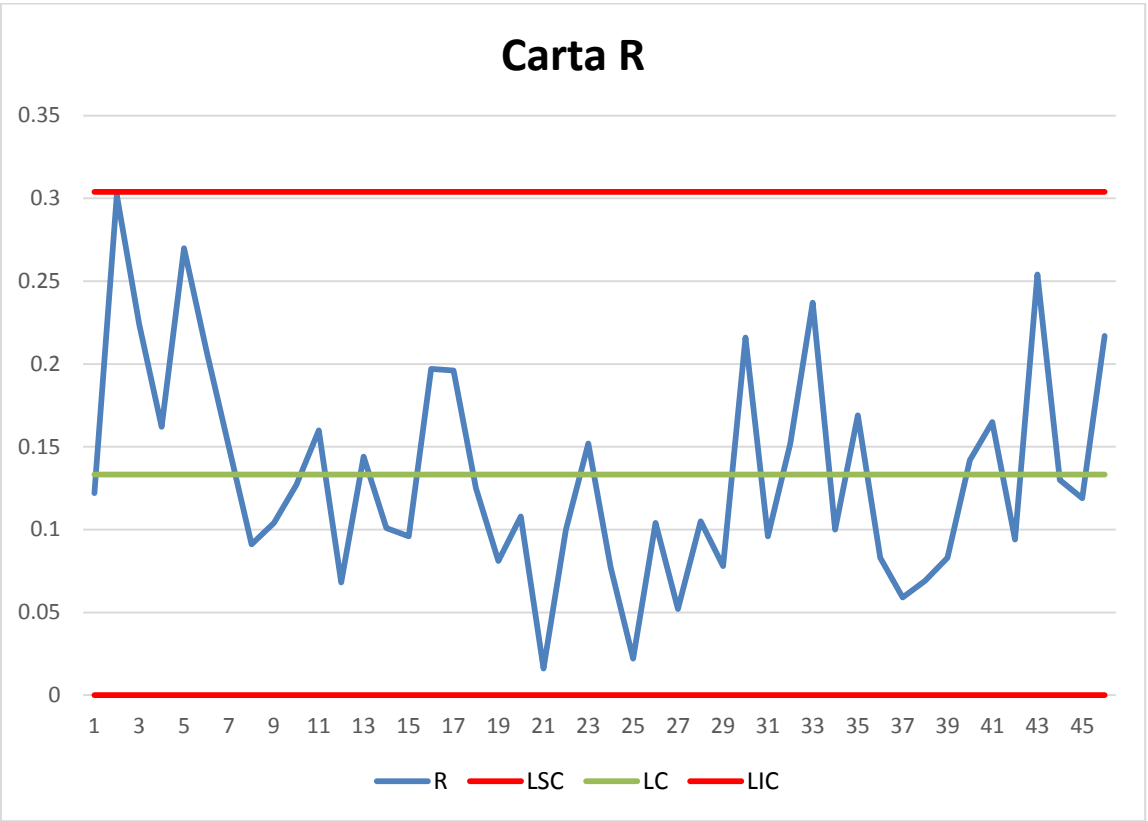
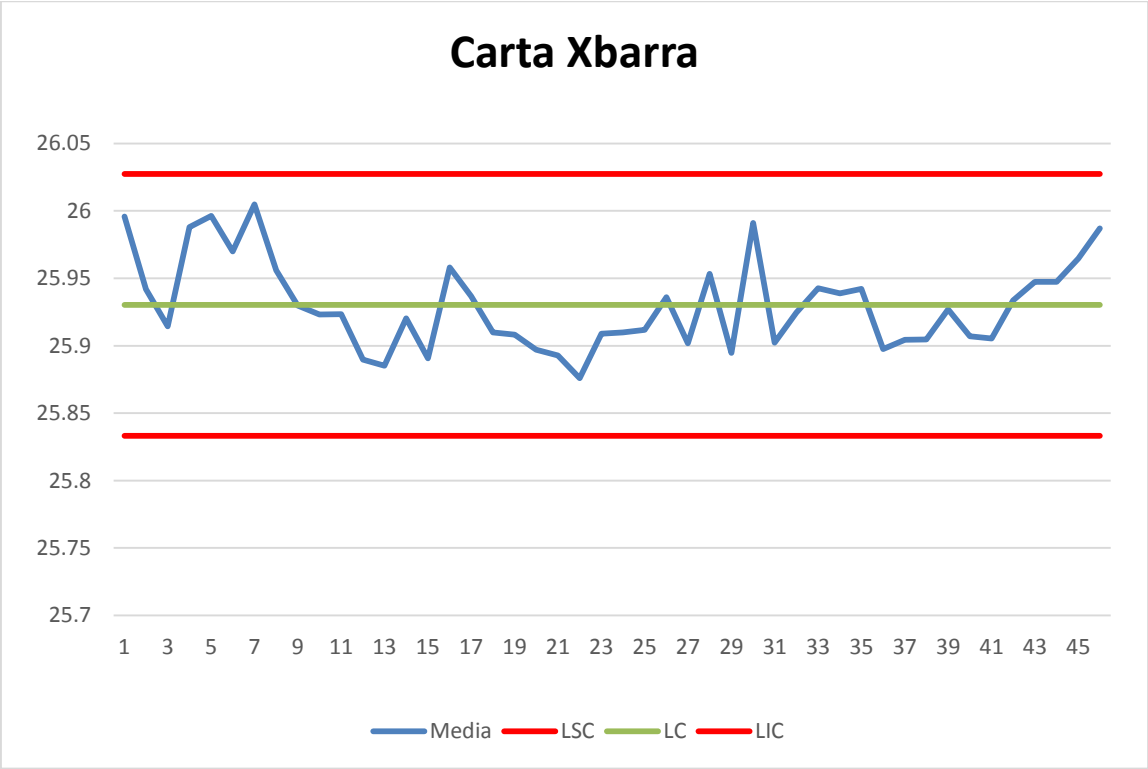


Figura A.10 - Carta X e Carta R. Injetor 5, Fila 10

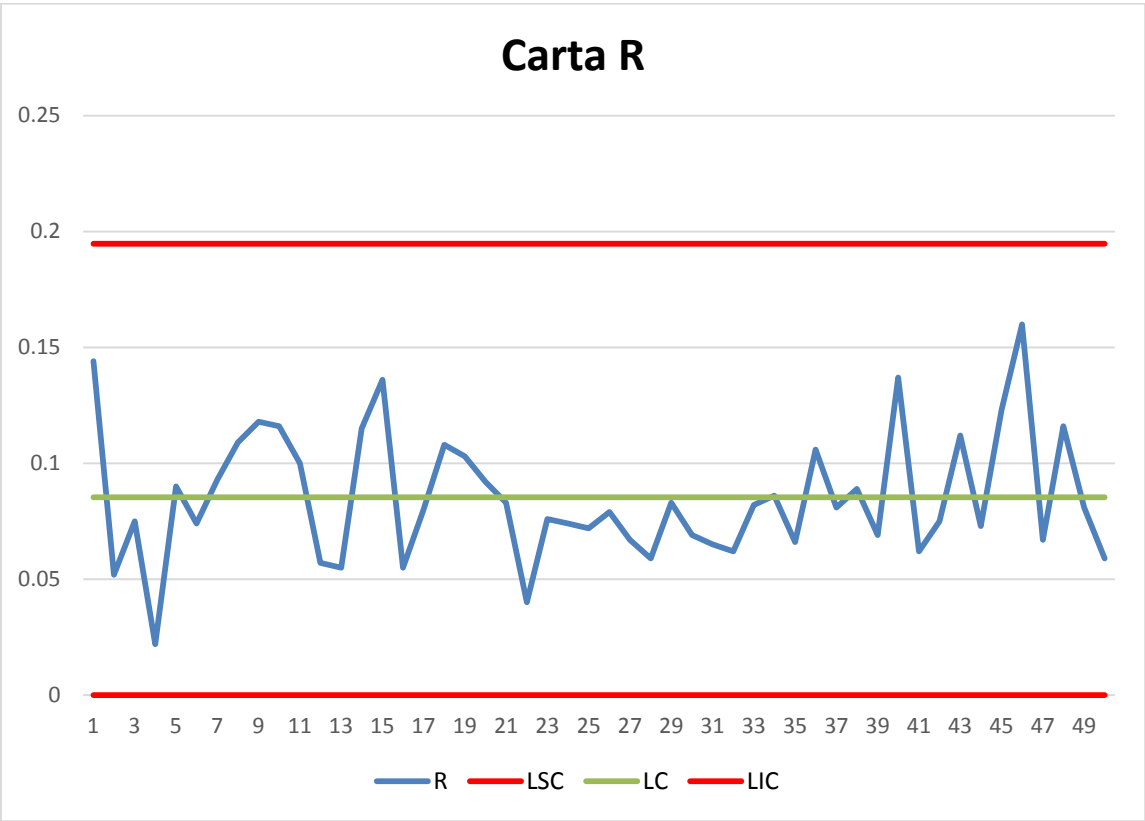
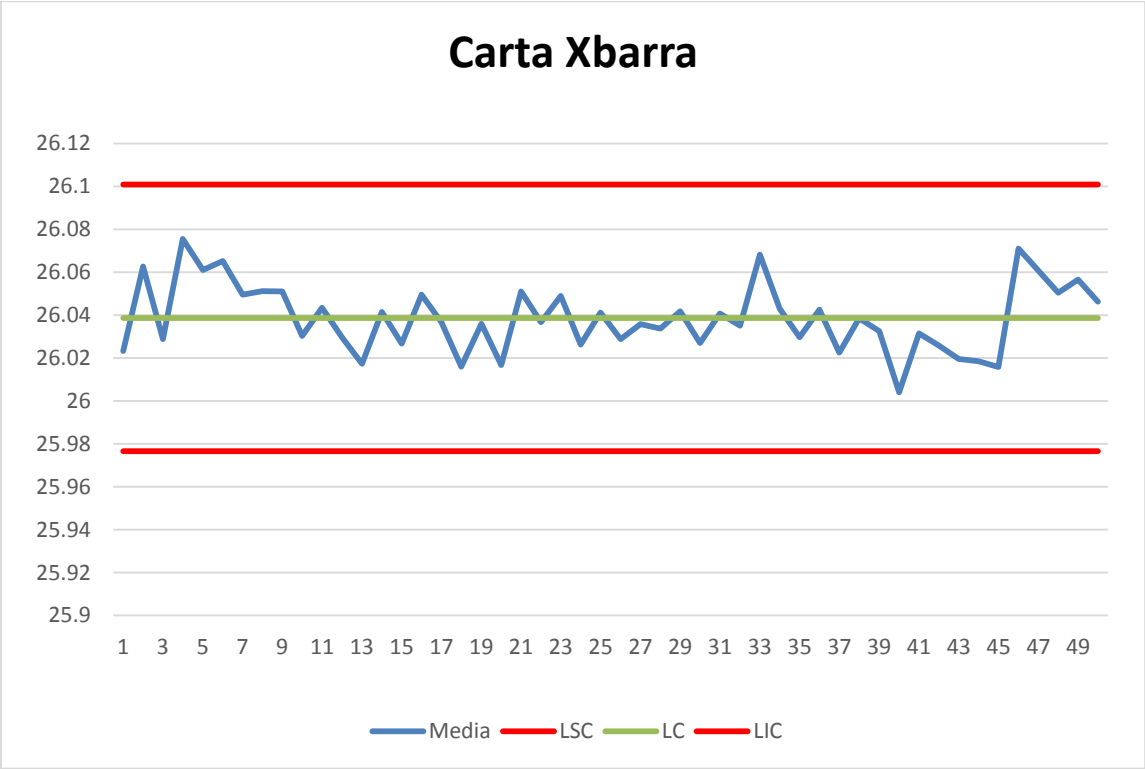


Figura A.11 - Carta X e Carta R. Injetor 6, Fila 11

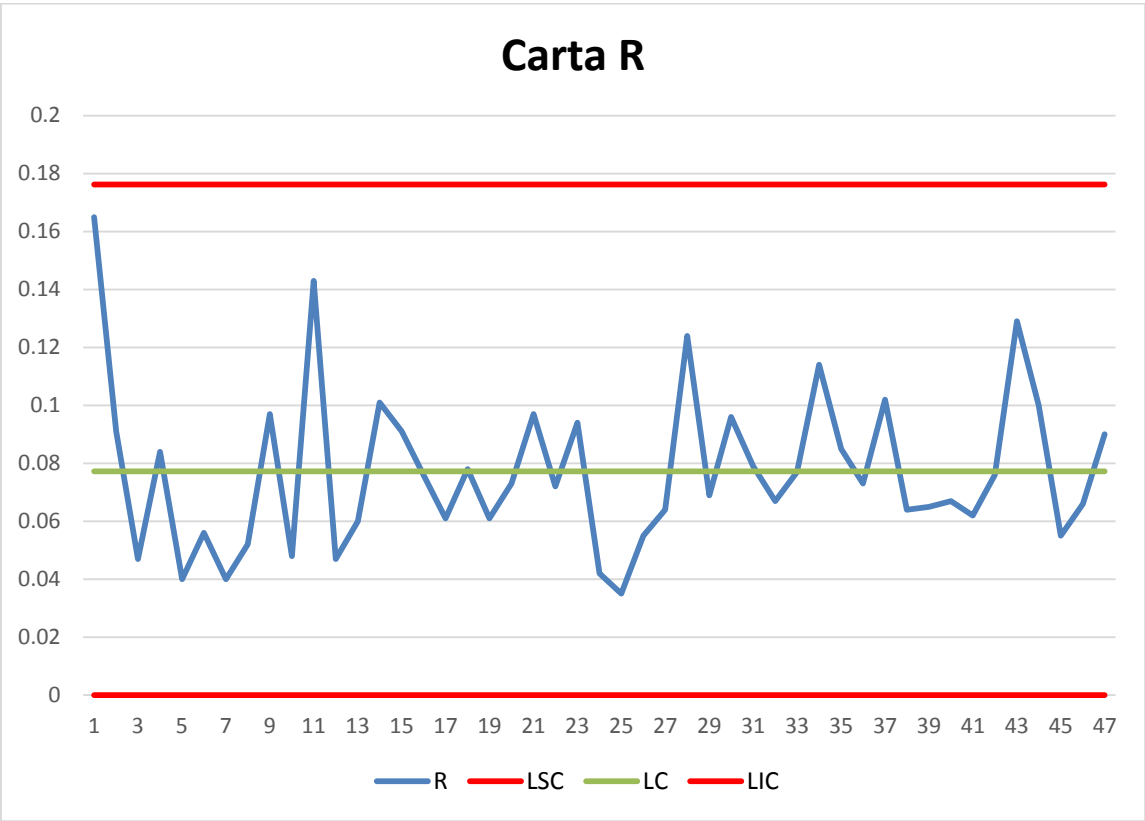
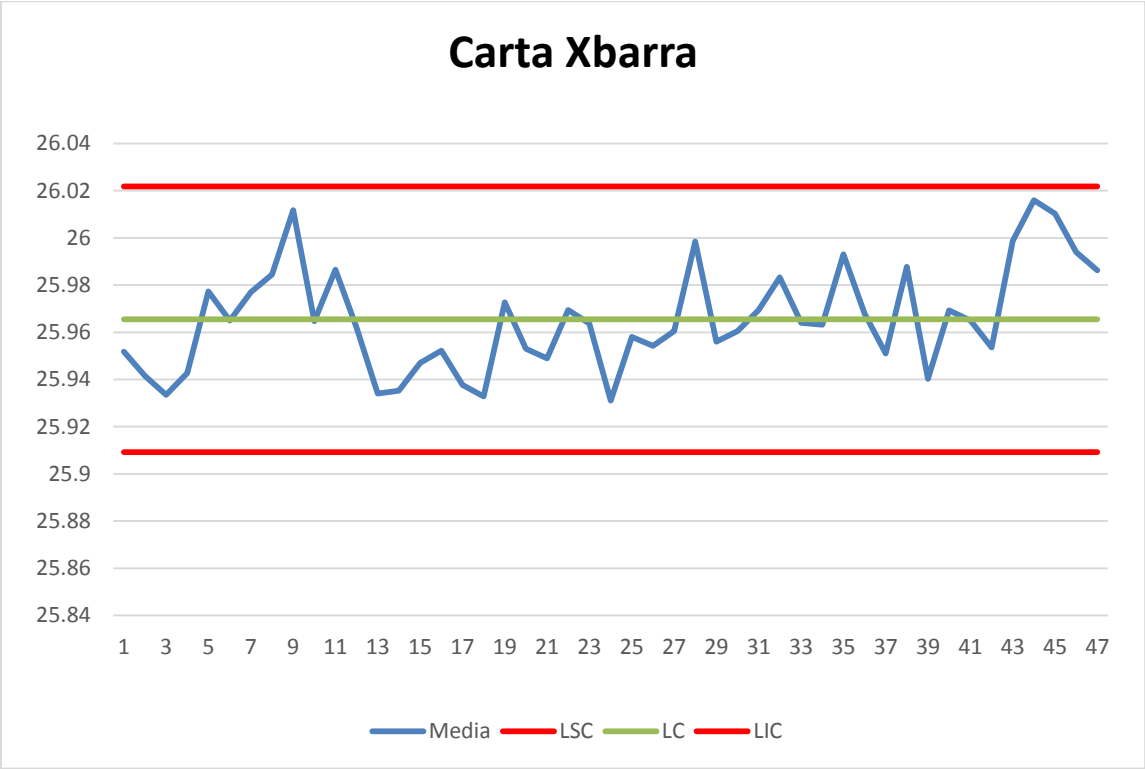


Figura A.12 - Carta *X* e Carta R. Injetor 6, Fila 12

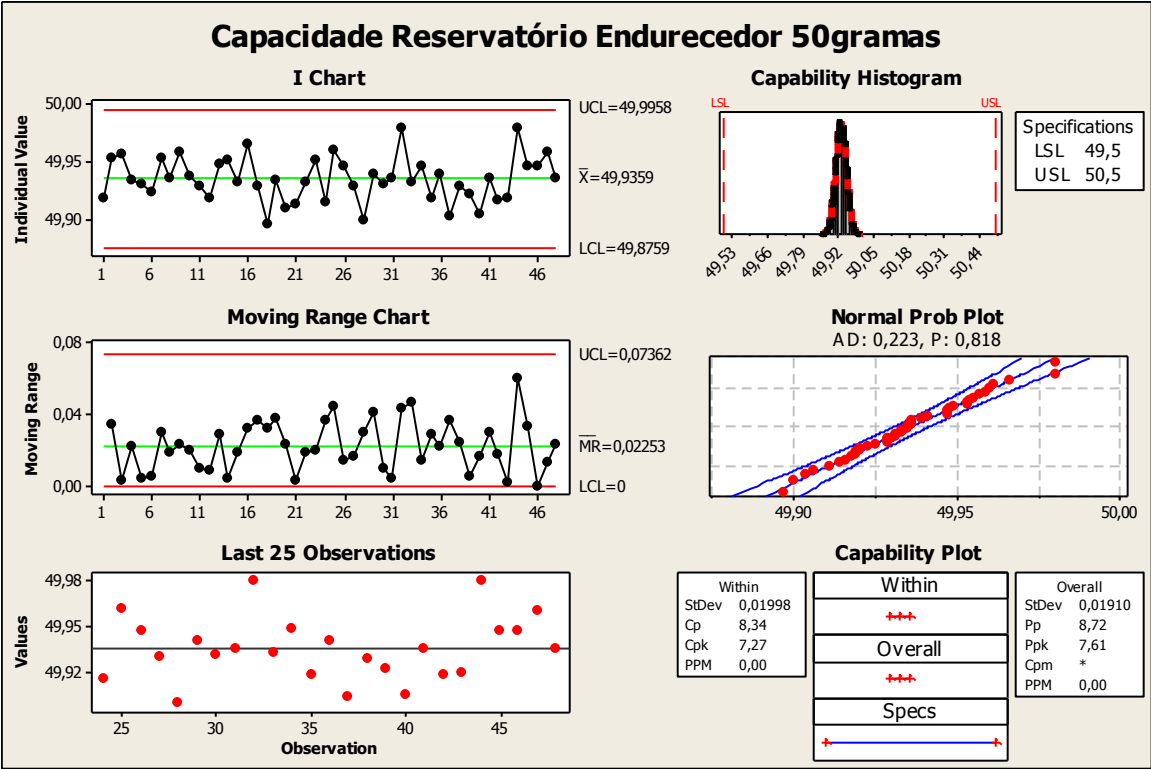


Figura A.13 - Análise da capacidade do reservatório do endurecedor para vazamento igual a 50gramas

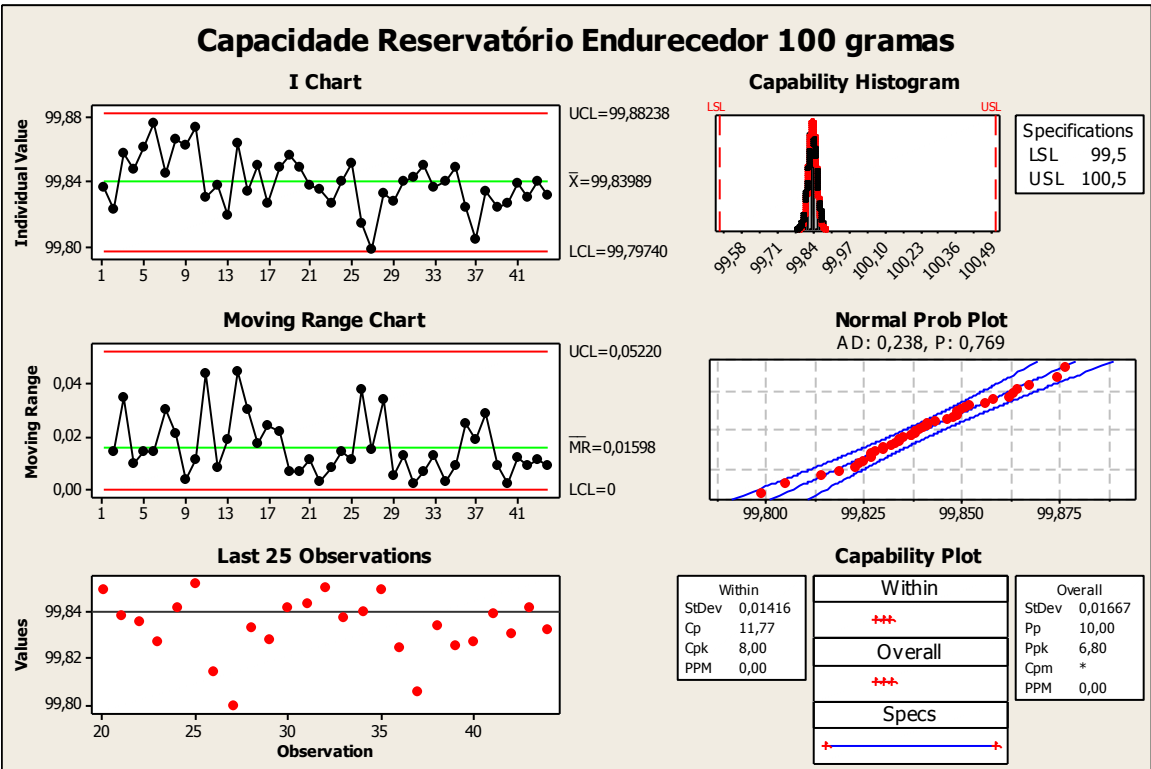


Figura A.14 - Análise da capacidade do reservatório do endurecedor para vazamento iguala 100gramas

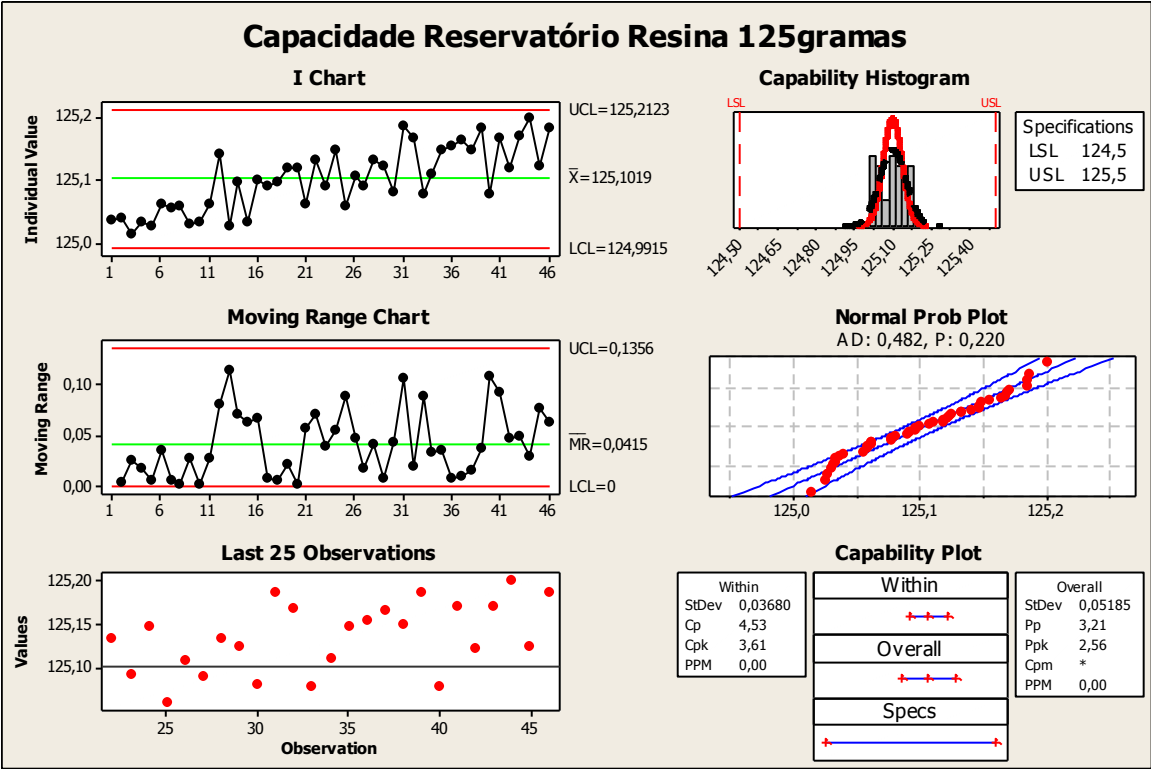


Figura A.15 - Análise da capacidade do reservatório da resina para 125gramas

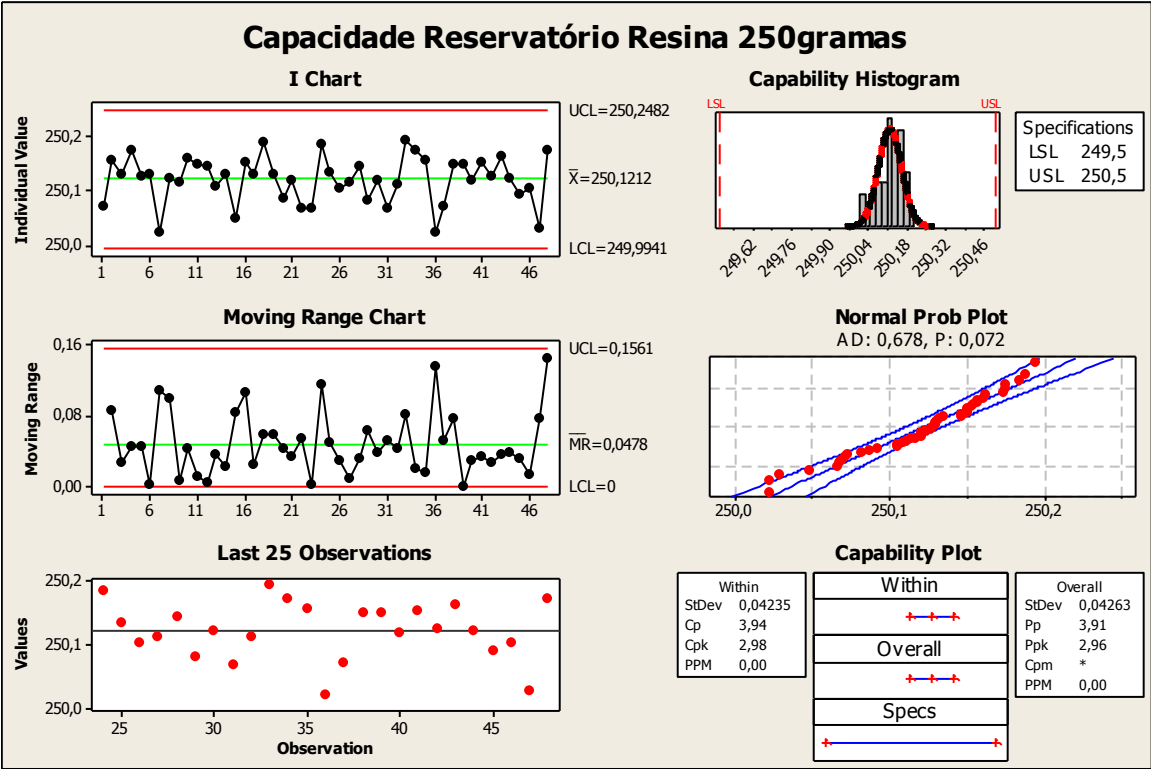


Figura A.16 -Análise da capacidade do reservatório da resina para 250gramas

ANEXO B
Material de Apoio ao *DOE*

Tabela B. 1 - Resultados da primeira experiência do DOE de Taguchi

| 1st RUN | | | | | | | | |
|------------|-----|-----------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| Model Name | DOE | Model Nbr | Laser Prefix | Date | AVG_V1 | AVG_V2 | AVG_V3 | AVG_V4 |
| OPEL_PDA | 1 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,78 | 41,39 | 41,77 | 41,82 |
| OPEL_PDA | 1 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,01 | 41,79 | 42,05 | 42,31 |
| OPEL_PDA | 1 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,11 | 42,19 | 42,1 | 42,34 |
| OPEL_PDA | 2 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,29 | 41,71 | 42,06 | 41,71 |
| OPEL_PDA | 2 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,19 | 41,66 | 42,31 | 42,83 |
| OPEL_PDA | 2 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,62 | 40,6 | 41,54 | 42,65 |
| OPEL_PDA | 3 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,83 | 42,23 | 42,4 | 42,4 |
| OPEL_PDA | 3 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,17 | 42,32 | 42,74 | 42,56 |
| OPEL_PDA | 3 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,07 | 41,63 | 41,92 | 42,63 |
| OPEL_PDA | 4 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,04 | 41,12 | 41,19 | 41,76 |
| OPEL_PDA | 4 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,96 | 41,58 | 41,49 | 41,76 |
| OPEL_PDA | 4 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,61 | 41,19 | 41,79 | 42,09 |
| OPEL_PDA | 5 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,36 | 41,58 | 42,04 | 42,27 |
| OPEL_PDA | 5 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,07 | 40,76 | 41,51 | 41,31 |
| OPEL_PDA | 5 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,4 | 41,72 | 41,98 | 41,49 |
| OPEL_PDA | 6 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,38 | 41,03 | 41,68 | 42,29 |
| OPEL_PDA | 6 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,78 | 41,65 | 42,67 | 42,21 |
| OPEL_PDA | 7 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,64 | 41,19 | 41,59 | 42,15 |
| OPEL_PDA | 7 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 40,87 | 39,93 | 41,43 | 41,61 |
| OPEL_PDA | 7 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,63 | 41,09 | 41,49 | 41,63 |
| OPEL_PDA | 8 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,41 | 41,03 | 41,58 | 41,62 |
| OPEL_PDA | 8 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,29 | 41,37 | 41,49 | 42,33 |
| OPEL_PDA | 8 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,47 | 41,6 | 41,95 | 41,72 |
| OPEL_PDA | 9 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,35 | 41,77 | 41,92 | 42,41 |
| OPEL_PDA | 9 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,12 | 41,07 | 41,04 | 41,94 |
| OPEL_PDA | 9 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,75 | 41,6 | 41,89 | 41,93 |

Tabela B. 2 - Resultados da primeira replicação do DOE de Taguchi

| 2nd RUN | | | | | | | | |
|------------|-----|-----------|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| Model Name | DOE | Model Nbr | Laser Prefix | Date | AVG_V1 | AVG_V2 | AVG_V3 | AVG_V4 |
| OPEL_PDA | 1 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,39 | 42,14 | 42,02 | 42,45 |
| OPEL_PDA | 1 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,61 | 41,27 | 42 | 41,99 |
| OPEL_PDA | 1 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,55 | 41,69 | 42,15 | 42,38 |
| OPEL_PDA | 2 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,95 | 41,68 | 41,55 | 42,36 |
| OPEL_PDA | 2 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,34 | 40,5 | 41,58 | 41,66 |
| OPEL_PDA | 2 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,92 | 40,82 | 41,65 | 41,88 |
| OPEL_PDA | 3 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,76 | 41,62 | 42 | 42,45 |
| OPEL_PDA | 3 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,87 | 41,03 | 41,41 | 42,2 |
| OPEL_PDA | 4 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,14 | 40,98 | 40,81 | 41,68 |
| OPEL_PDA | 4 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,38 | 41,42 | 41,99 | 42,25 |
| OPEL_PDA | 4 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,93 | 41,72 | 41,74 | 42,43 |
| OPEL_PDA | 5 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,38 | 41,8 | 42,12 | 42,42 |
| OPEL_PDA | 5 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,74 | 41,4 | 41,92 | 41,77 |
| OPEL_PDA | 5 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,9 | 41,6 | 42,06 | 41,79 |
| OPEL_PDA | 6 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,03 | 41,7 | 42,26 | 42,5 |
| OPEL_PDA | 7 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,08 | 41,52 | 41,95 | 42,44 |
| OPEL_PDA | 7 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,66 | 40,93 | 41,72 | 41,82 |
| OPEL_PDA | 7 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,31 | 42,14 | 42,31 | 42,63 |
| OPEL_PDA | 8 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,87 | 41,33 | 41,84 | 41,78 |
| OPEL_PDA | 8 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,58 | 41,4 | 42,02 | 42,6 |
| OPEL_PDA | 8 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,61 | 40,82 | 41,63 | 41,26 |
| OPEL_PDA | 9 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 42,02 | 41,23 | 41,53 | 41,74 |
| OPEL_PDA | 9 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,66 | 40,4 | 41,9 | 41,56 |
| OPEL_PDA | 9 | 1104082 | OPEL | 01-06-2013 | 41,58 | 40,76 | 41,27 | 31,37 |

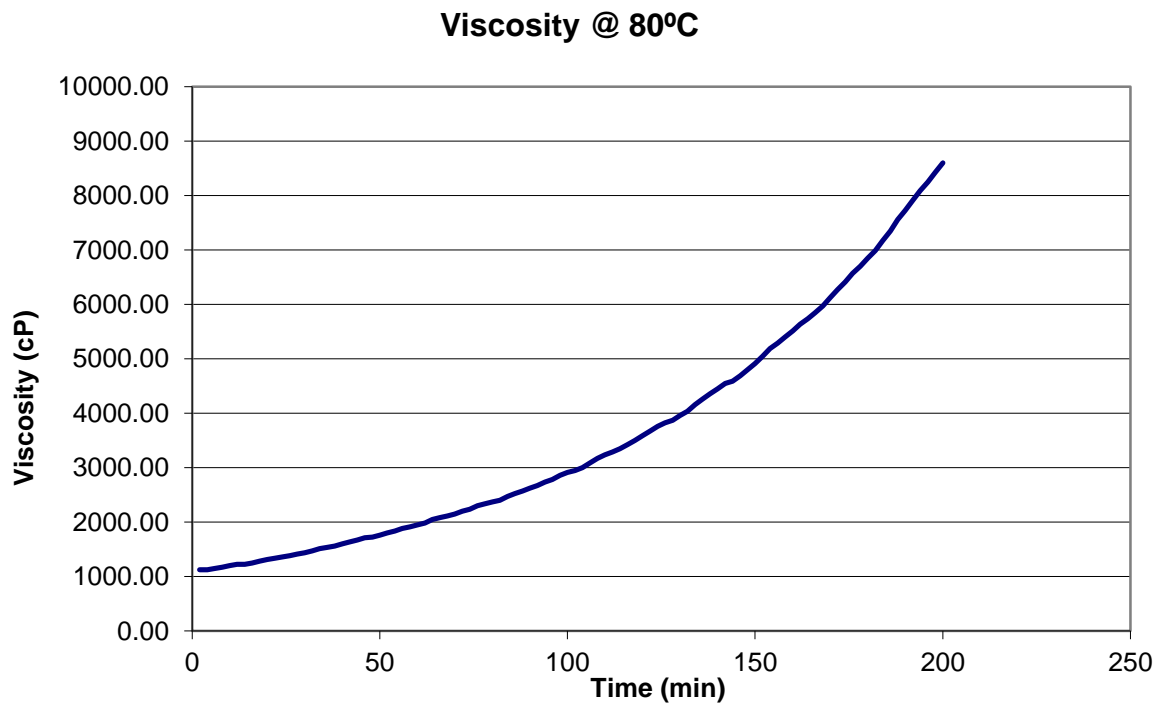


Figura B. 1 - Perfil de cura do epoxy a 80°C na cuba de laboratório

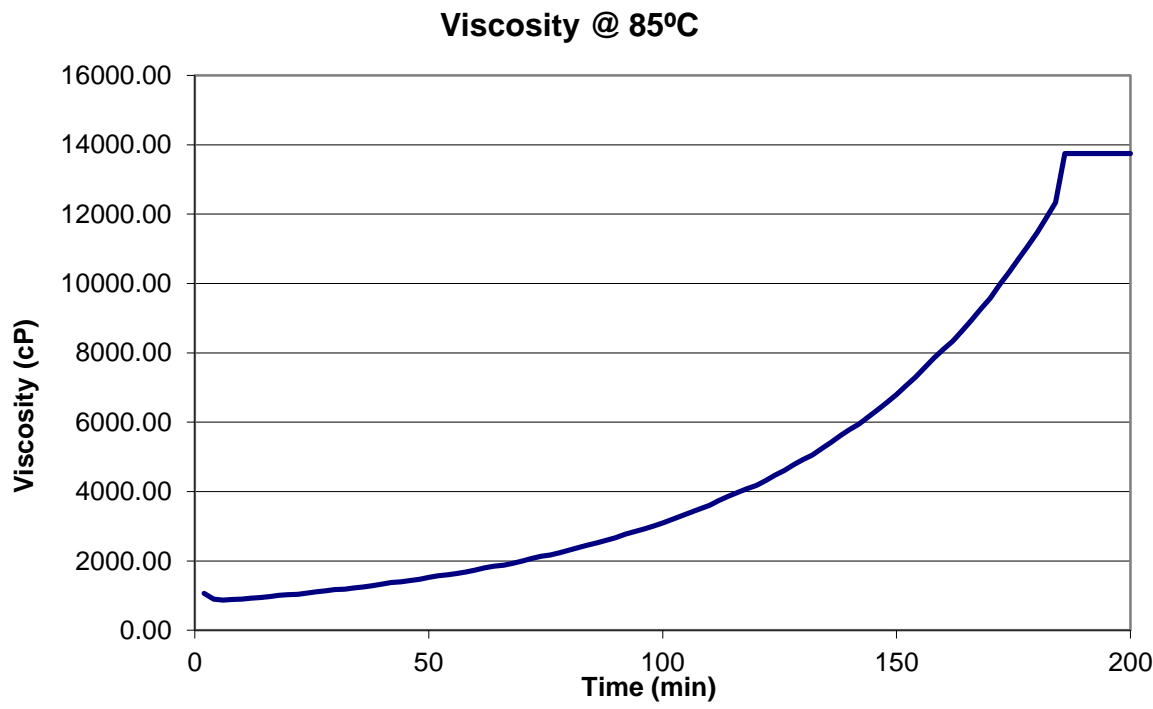


Figura B. 2 - Perfil de cura do epoxy a 85°C na cuba de laboratório

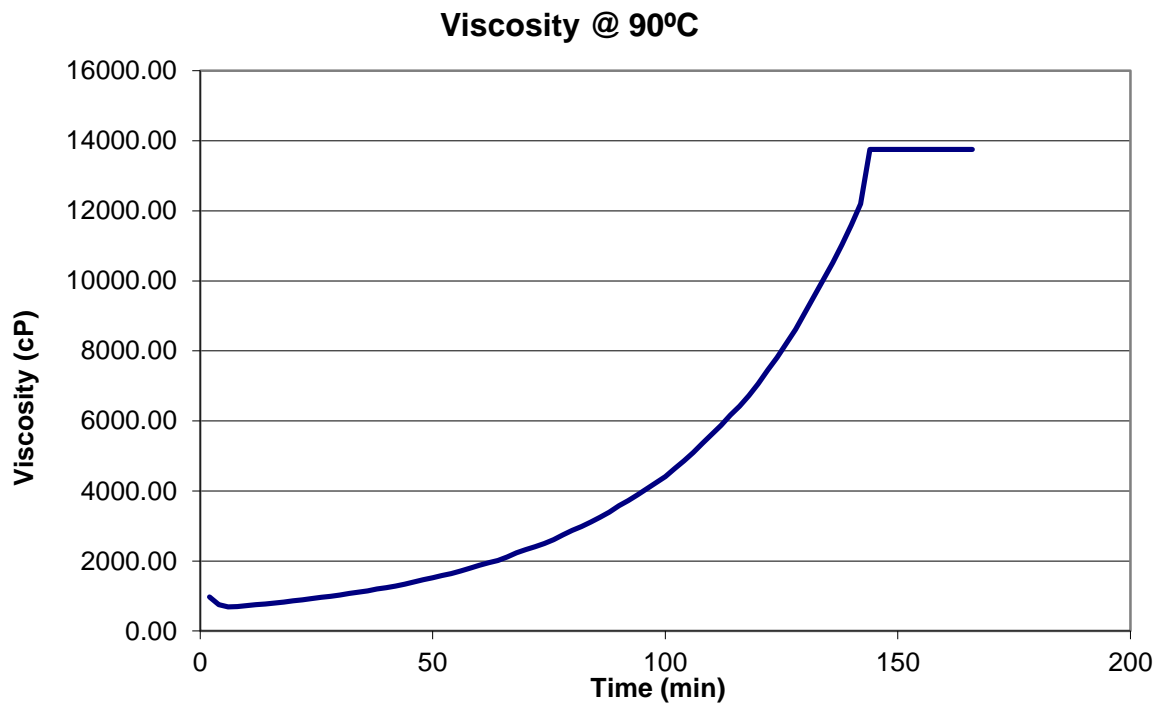


Figura B. 3 - Perfil de cura do epoxy a 90°C na cuba de laboratório

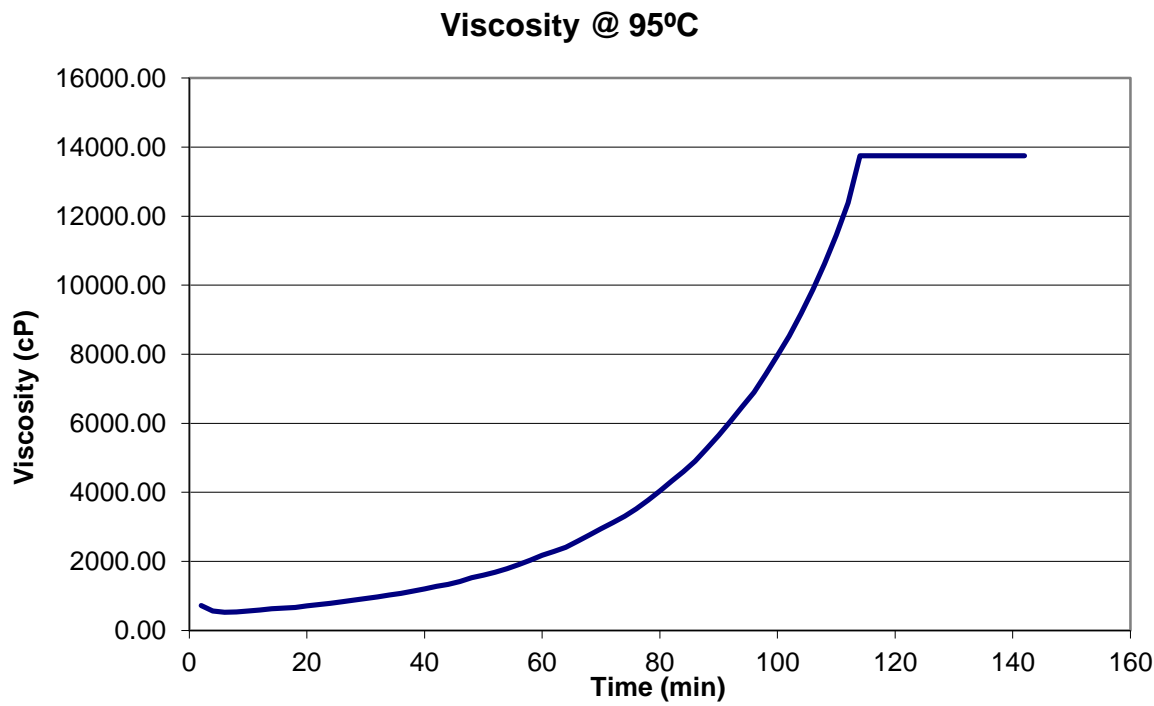


Figura B. 4 - Perfil de cura do epoxy a 95°C na cuba de laboratório

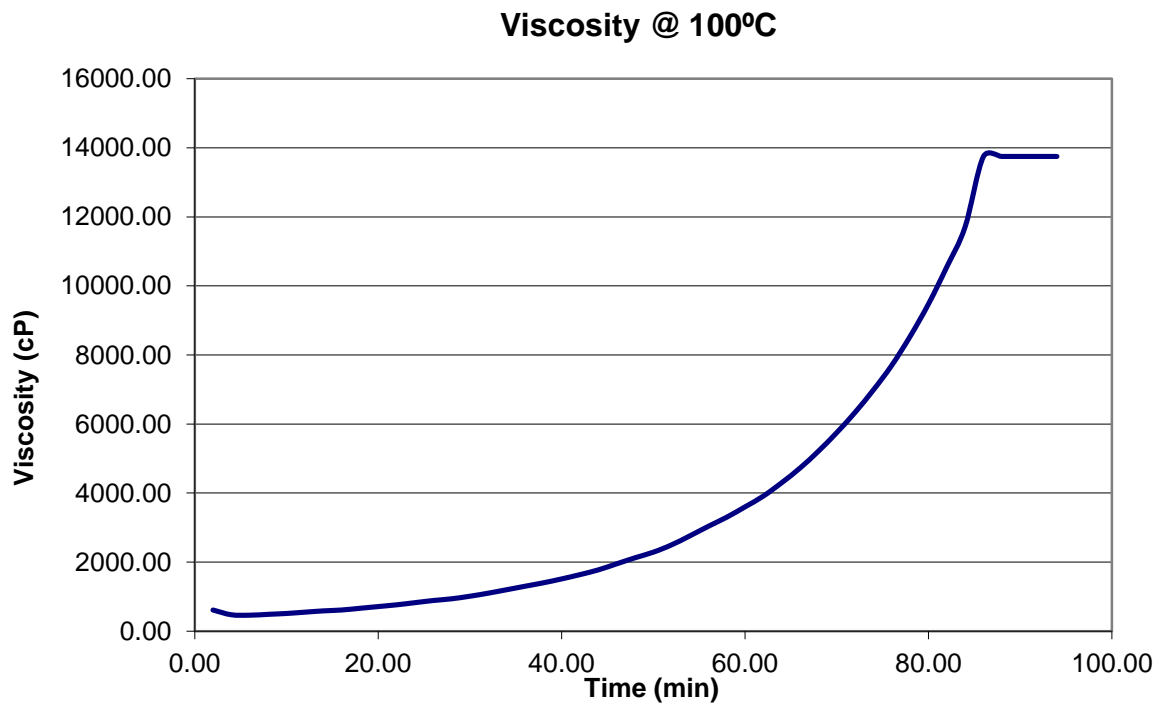


Figura B. 5 - Perfil de cura do epoxy na cuba do laboratório

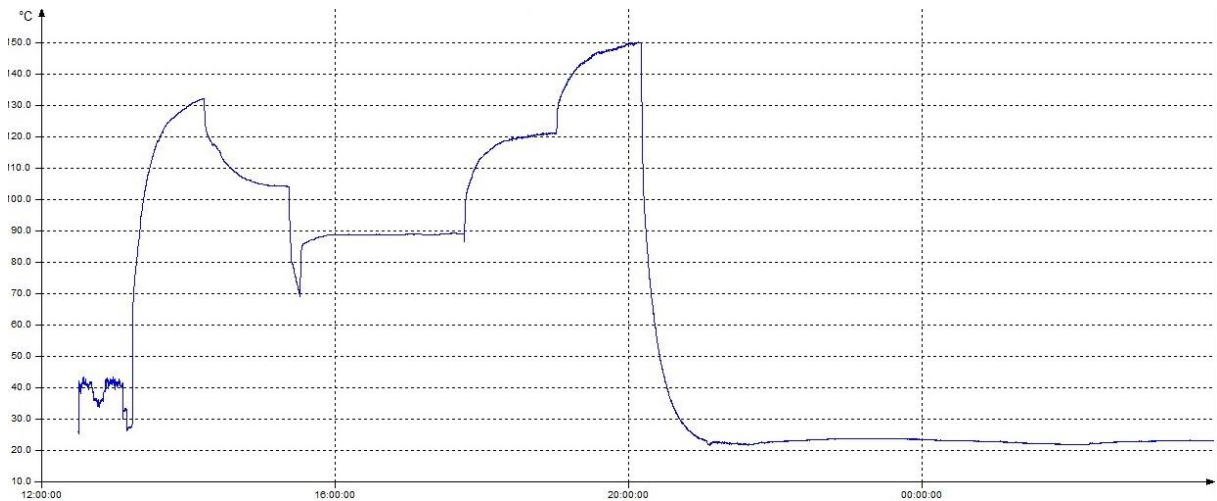


Figura B. 6 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 1

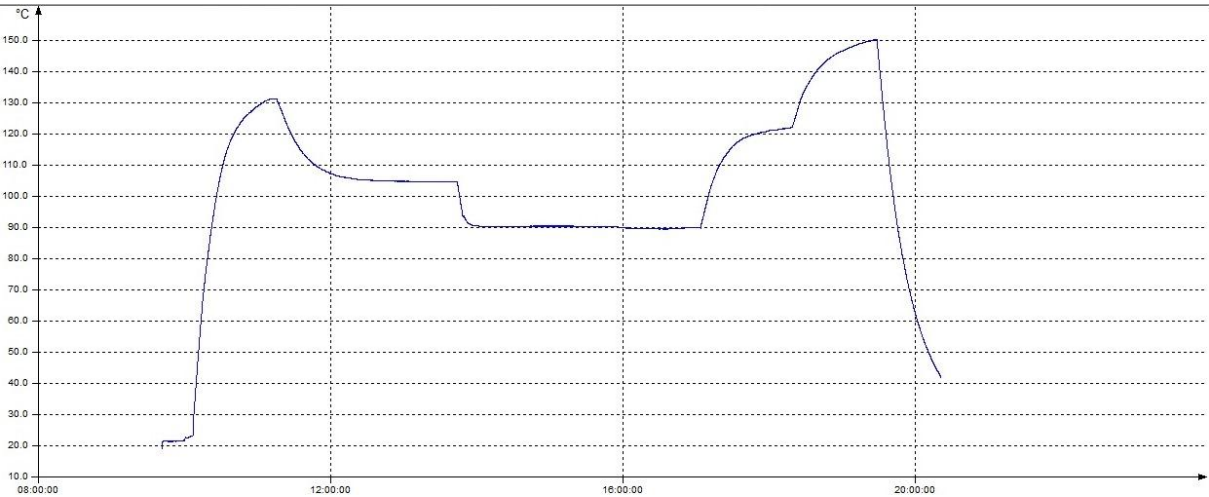


Figura B. 7 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 2

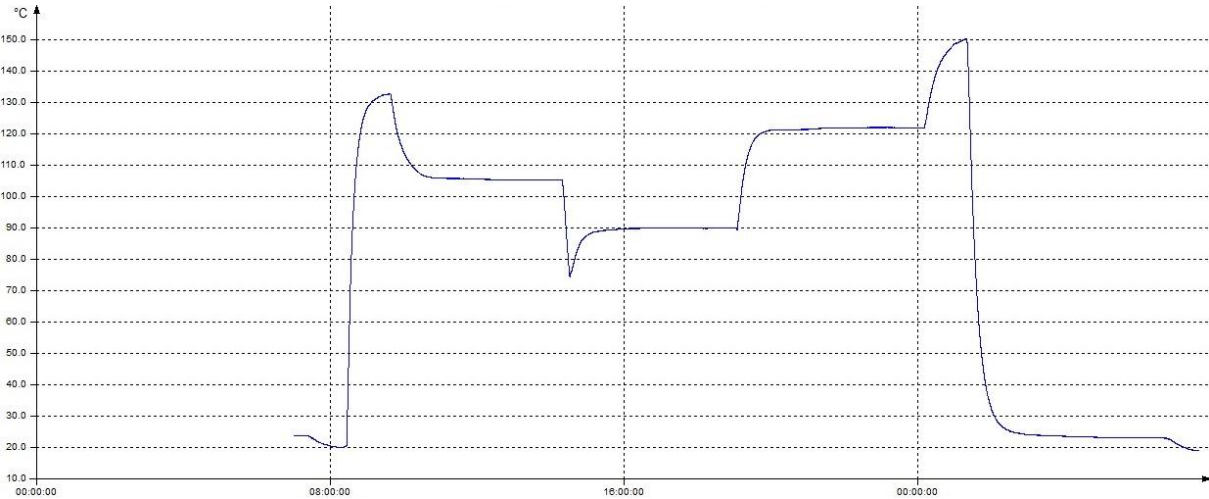


Figura B. 8 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 3

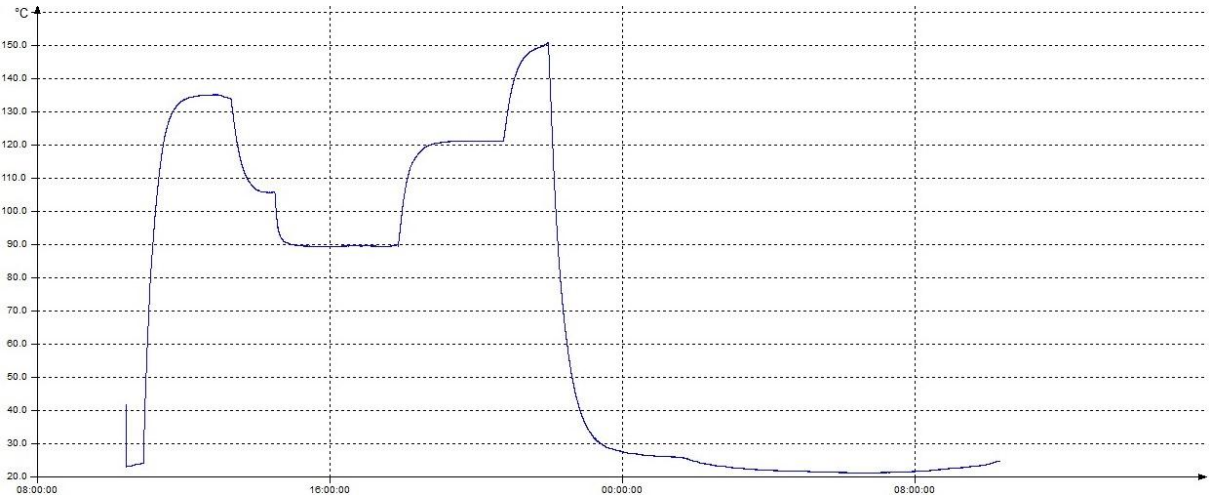


Figura B. 9 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 4

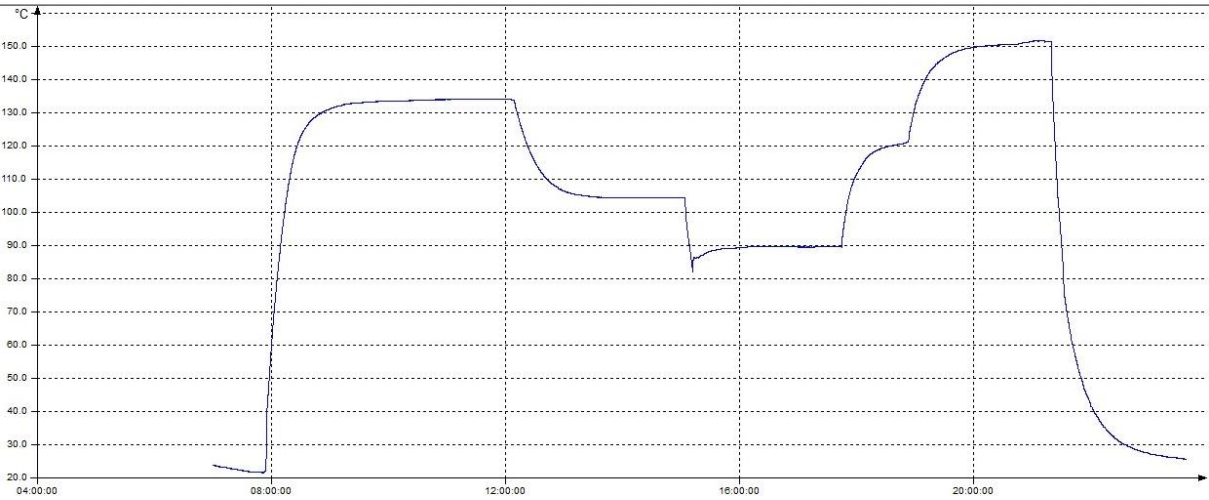


Figura B. 10 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 5

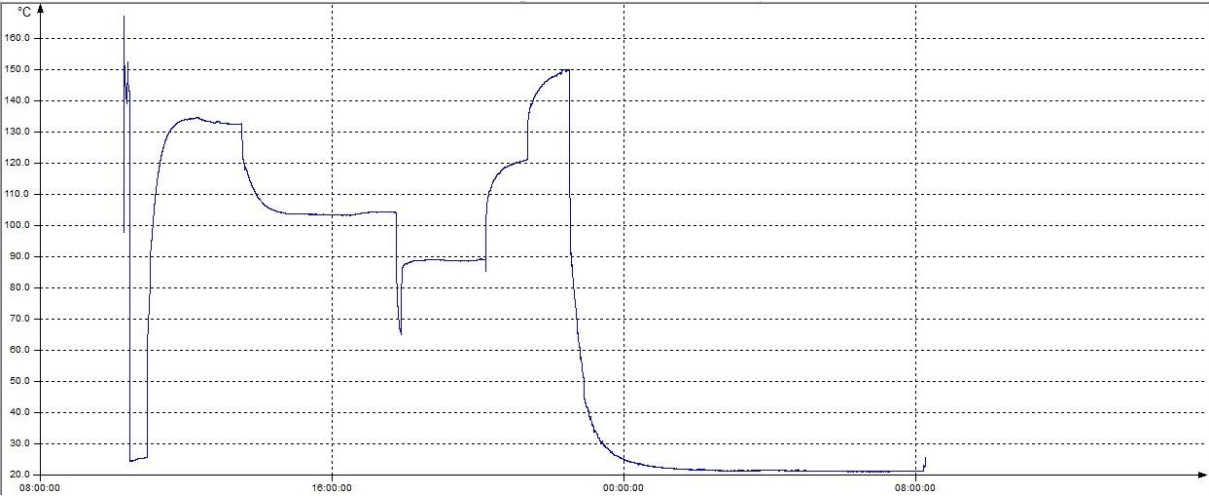


Figura B. 11 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 6

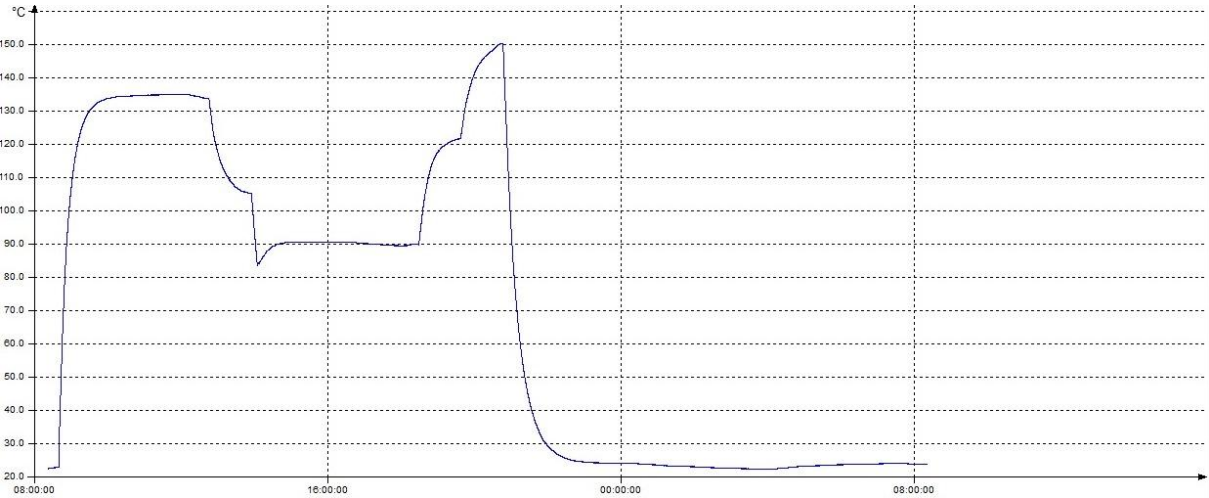


Figura B. 12 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 7

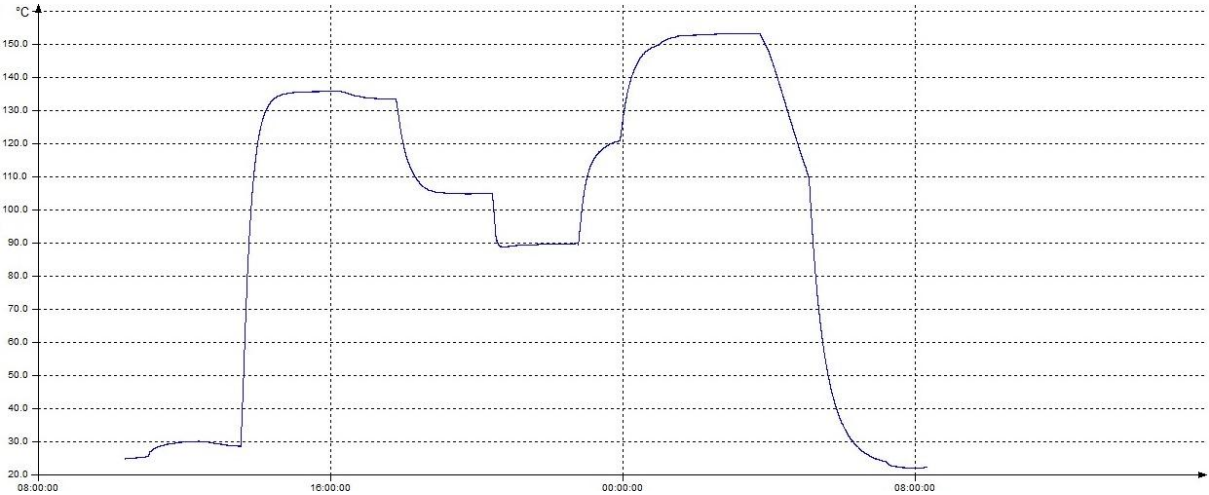


Figura B. 13 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 8

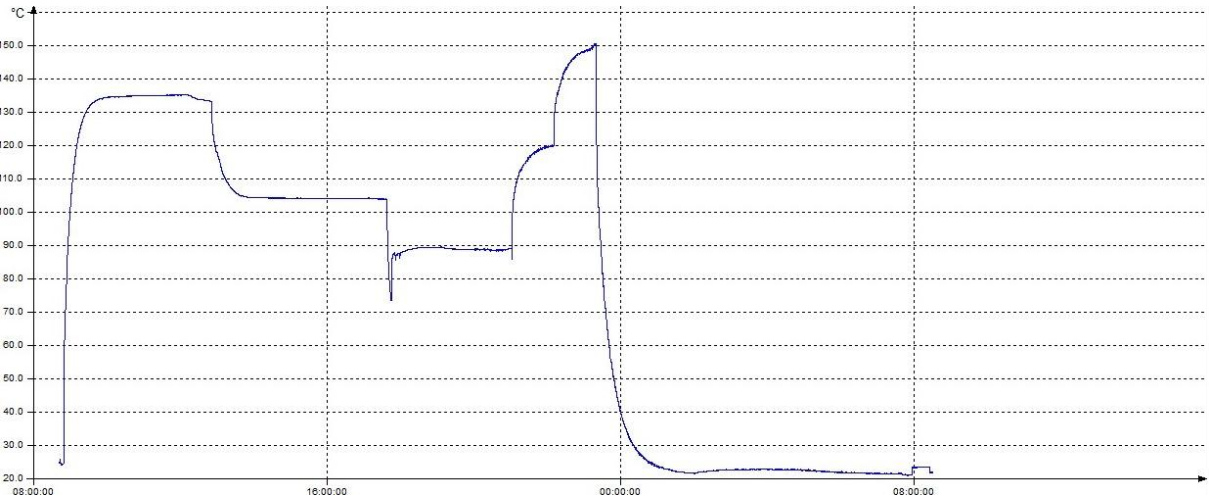


Figura B. 11 – DOE - Perfil de cura característico da experiência 9